



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OVĚŘENÍ MOŽNOSTI VYUŽITÍ TAHOVÉ DEFORMACE PŘI HOPKINSONOVĚ TESTU

VERIFICATION OF THE EXPLOTATION POSSIBILITY OF TENSILE STRAIN DURING
THE HOPKINSON'S TEST

ZKRÁCENÁ VERZE PhD. THESIS
THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. IVO DOHNAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.

BRNO 2014

OBSAH

Úvod	3
1 Cíle dizertační práce	4
2 Současný stav poznání tahových zkoušek prováděných na Hopkinsonově zařízení	5
3 Zkušební zařízení pro vysoké rychlosti deformace.....	6
3.1 Hopkinsonova metoda dělených tyčí	6
4 Experimentální část.....	7
4.1 Vstupní testy materiálu	8
4.2 Ověření správné činnosti Hopkinsonova zařízení	9
4.3 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – válcové vzorky	11
4.4 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – ploché vzorky	11
4.5 Numerická simulace tahového testu s úpravou pro ploché vzorky	13
4.6 Provedení experimentů s navrženou úpravou pro ploché vzorky	17
4.7 Vyhodnocení provedených experimentů	18
4.8 Porovnání výsledků experimentu a numerické simulace	22
4.9 Další výsledky získané z provedených experimentů	25
5 Závěry	27
Použitá literatura	
Přehled činností autora	
Abstrakt	
Curriculum vitae	

ÚVOD

Dnešní doba je doprovázena rychlým rozvojem techniky. Hlavní důraz je proto kladen na snižování výrobních časů, z čehož plynou velké nároky na výkony produkčních strojů. Tyto aspekty s sebou přináší finanční úspory, které se následně promítají do konkurenceschopnosti subjektů v daném oboru. K rychlému rozvoji nedochází pouze v oblasti techniky, ale také v oblasti zabývajících se materiály a jejich chováním.

Jednou ze základních veličin ve tváření je rychlost deformace. Obecnou platností je, že se zvyšující se rychlostí deformace také narůstá deformační odpor materiálu a dochází k poklesu tvárnosti materiálu. S narůstajícím deformačním odporem materiálu v závislosti na přetvoření se od určité rychlosti deformace významně projevuje i tzv. dynamická mez kluzu [1]. Na součásti vyráběné tvářením tedy výrazně působí kinetická energie nástroje. Např. tvářecí automaty jsou schopny vyrábět součásti rychlostí i stovek kusů za minutu. Toto je také jeden z důvodů, proč jsou kladeny vysoké nároky na materiály nástrojů. Ty musí být zvoleny tak, aby při použití nedocházelo k jejich plastické deformaci [1]. Z hlediska zatížení zde významnou roli hrají také setrvačné síly. K dosažení správné volby jak materiálu a geometrie nástroje, tak i materiálu polotovaru je vhodné využít počítačovou simulaci takového děje. Jedná se o rychlý a efektivní způsob řešení nastalého problému. Vytvořený model musí být nastaven tak, aby byly zachovány všechny podstatné parametry ovlivňující předmětný proces. Je nutné mít stále na paměti, že dynamický děj trvá řádově v desítkách mikrosekund. Tomu musí odpovídat vhodný simulační program, např. ANSYS LS DYNA nebo ABAQUS-Explicit.

Získané informace o chování materiálů za vysokých rychlostí deformace jsou nejvíce využívány pro vojenský a automobilní průmysl a je nutno si uvědomit, že dostupné informace zabývajících se vysokou rychlostí deformace jsou v omezené míře. Zařízení pro stanovení mechanických vlastností materiálu za dynamických podmínek jsou známá, ale i tak je možné na nich provádět další úpravy. K tomu, aby bylo možné získané informace interpretovat, použít v praxi nebo na nich dále pracovat a rozšiřovat je, je zapotřebí širokých znalostí z oblasti matematiky, fyziky, nauky o materiálech a výpočetní techniky. Experimentální zařízení, na kterých jsou prováděny mechanické zkoušky za dynamických podmínek zatěžování, se nacházejí i na Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně, Odboru technologie tváření kovů a plastů. Jedná se konkrétně o zařízení pro Taylorův test a Hopkinsonův test.

Hlavním cílem dizertační práce je navržení a ověření tahového přípravku, který bude sloužit k provádění dynamických tahových zkoušek plochých vzorků na Hopkinsonově zařízení. Pro ověření správnosti navržené úpravy bude také využito simulačního programu ANSYS LS DYNA, který je vhodný pro vysokorychlostní děje. Navržený tahový přípravek bude testován na vybrané korozivzdorné oceli.

1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním přínosem dizertační práce je ověření navržené úpravy Hopkinsonova zařízení k provádění tahových zkoušek. Jako výchozí testovací materiál byla vybrána korozivzdorná chrom niklová austenitická ocel dle ČSN 41 7240 tloušťky 2 mm. Předmětný materiál bude podroben rázovému zatížení v tahu za určitých definovaných podmínek, tj. bude podroben zkouškám na Hopkinsonově zařízení.

Ověření experimentálně zjištěných výsledků mechanického chování zvolené oceli bude porovnáno s provedenou numerickou simulací. Toto ověření je důležité z hlediska vývoje metodiky vyhodnocování tahových zkoušek na tomto zařízení.

Cíle dizertační práce:

- Vývoj a ověření navrženého přípravku pro tahovou variantu při Hopkinsonově testu.
- Provedení a vyhodnocení fyzikálních experimentů na vybraném materiálu.
- Provedení numerické simulace tahového testu na Hopkinsonově zařízení.
- Porovnání a zhodnocení výsledků.

K dosažení cílů dizertační práce je třeba:

- Vyhodnocení fyzikálních experimentů a vyslovení příslušných závěrů.
- Porovnání výsledků experimentů s numerickou simulací.
- Výzkum a vývoj komponentu pro možnosti tahových zkoušek na Hopkinsonově testu.
- Zhodnocení vlivu navržené úpravy Hopkinsonova testu na celkový výsledek provedených experimentů.

Naplnění cílů dizertační práce představuje přínos v oblasti mechanického chování předmětné korozivzdorné austenitické oceli vystavené rázovému zatížení. Dalším přínosem je modernizace Hopkinsonova testu, která spočívá ve vývoji a ověření komponentu k provádění dynamických tahových zkoušek.

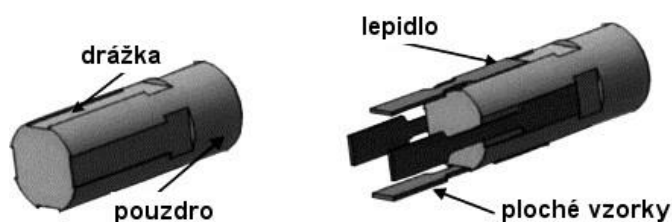
Poznámka autora:

Úpravy komponentu pro Hopkinsonův test, technické a finanční zabezpečení pro uvedené experimentální práce by nebylo možno provést bez podpory Interní grantové agentury VUT, tj. projektů FSI-S-11-26, FSI-S-12-5, FSI-J-12-1818, FSI-J-13-2041, ve kterých je autor této práce navrhovatelem nebo spoluřešitelem.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ TAHOVÝCH ZKOUŠEK PROVÁDĚNÝCH NA HOPKINSONOVĚ ZAŘÍZENÍ

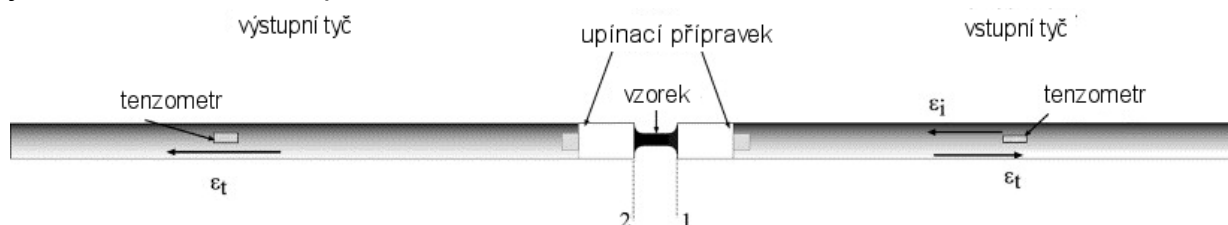
Metoda Hopkinsonovy dělené tyče je primárně určena pro kompresní zkoušky materiálu, kde na vzorek působí rázové zatížení [1]. Jak uvádí Weinong a Bo [1], Hopkinsonovo zařízení není využíváno jen ke kompresním testům. V současnosti je snahou vyvíjet možné úpravy tohoto zařízení pro zkoušení i jiných materiálů než jsou kovy. Weinong a Bo popisují možnosti testování křehkých materiálů (keramika, sklo), pěny, plastů, biologických tkání a dalších. Současně se také zabývají tím, jak využít rázového zatížení k testování na tah nebo krut. K tahovým nebo torzním zkouškám je tedy nutné vyvinout takový přípravek, který umožní tyto zkoušky provést [1].

Haugou a Markiewicz [3] zkonstruovali jeden z možných způsobů upnutí plochých vzorků. Podstatou je dělené pouzdro (levá a pravá část), které je opatřeno čtyřmi drážkami určenými pro upnutí vzorků. Navržené pouzdro je opatřeno vnitřním závitem, který umožňuje připevnit daný přípravek na vstupní a výstupní tyč zařízení. Vzorky jsou upnuty do přípravku a zajištěny lepidlem. Jakmile jsou vzorky takto upevněny, je dále použita převlečná příruba, která je opatřena šrouby, jež slouží k vycentrování a zafixování vzorků na pouzdro. Schéma, které navrhli Haugou a Markiewicz [3], je na obr.1.



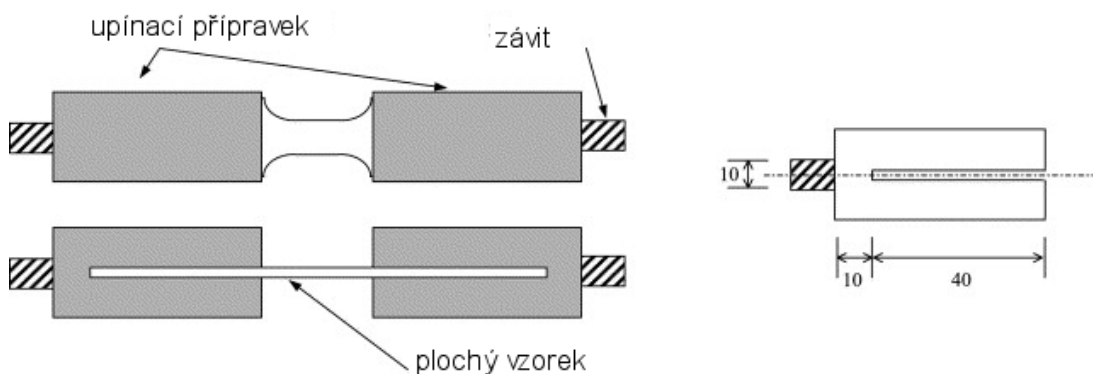
Obr. 1 Možný způsob upnutí vzorků [3]

Dalším možným způsobem se zabývali Góméz a Barbero [4]. Ti vytvořili přípravek k testování pouze jednoho vzorku, viz obr. 2. Zde je podstatou úprava, kde vzorek je upnutý do přípravku a zajištěn šroubem. Autoři v tomto případě neuvažují ještě s fixací vzorku lepidlem.



Obr. 2 Schéma zabudovaného přípravku na Hopkinsonově zařízení [4]

Upínací přípravek je i zde složen z levé a pravé části, které jsou upnuty do tyčí daného zařízení pomocí závitů. Autoři uvádí, že tímto testovali laminát do tloušťky 2 mm.



Obr. 3 Upínací přípravek dle Góméze a Barbera [4]

Další možné způsoby úpravy aparatury pro tento test publikovali autoři Weinong a Bo [1], Verleysen a Degrieck [5], Chen a Clausen [6], nebo Gerlach a Kettenbeil [7] a další.

3 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO VYSOKÉ RYCHLOSTI DEFORMACE

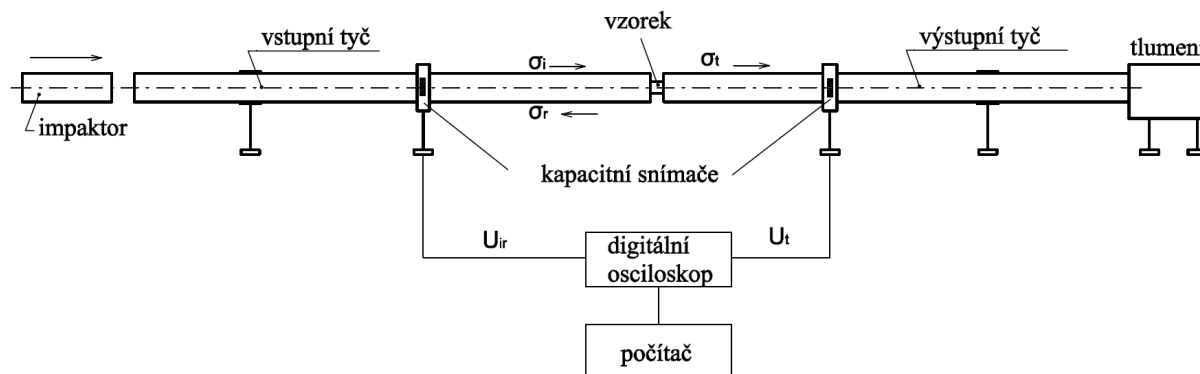
Metody zkoušení materiálů za dynamických podmínek, se kterými je možné se v současné době setkat, jsou Taylorův test a Hopkinsonův test. Obě tyto metody jsou primárně určeny ke kompresnímu namáhání testovaného materiálu. Pomocí těchto testů je možné získat průběhy křivek napětí, deformace nebo rychlosti deformace nebo také jen číselnou hodnotu maximálního dynamického napětí působícího na vzorek [1], [8], [9], [10], [11].

3.1 Hopkinsonova metoda dělených tyčí

Hopkinsonův test se v současnosti využívá ke stanovení dynamických mechanických charakteristik ocelí, slitin hliníku, mědi, titanu a dalších technických kovových i nekovových materiálů (především plastů). Tyto zkoušky se mohou provádět i za zvýšených teplot, např. do 500 °C [9].

Standardním Hopkinsonovým kompresním testem jsou zjišťovány mechanické vlastnosti materiálu při kompresním rázovém stlačení. Zařízení je tvořeno vstupní a výstupní tyčí, mezi nimiž je umístěn vzorek. Urychlený impaktor dopadá na vstupní tyč a předává jí svou kinetickou energii. Část kinetické energie impaktoru je spotřebována na plastickou deformaci vzorku a zbytek přechází do výstupní tyče, která je na konci opřena o pružný blok. Zařízení, které je na obr. 5, je jednoúčelové a lze na něm provádět pouze tlakové zkoušky. Aby bylo možné provádět na tomto zařízení jiné než jen tlakové zkoušky, musí být toto zařízení vhodným způsobem modifikováno.

Vstupní - zatěžující a výstupní tyč mají průměr 15 mm a délku 800 mm a na každé z nich je nasunut válcový kapacitní snímač. Tyče jsou vyrobeny z vysokopevnostní oceli VascoMax 350 (maraging ocel). Impaktor je vyroben ze stejné oceli jako tyče. Je možno použít impaktory různých délek (50, 100, 150, 200 a 300 mm), průměr impaktoru je 19 mm. Schéma tohoto zařízení je na obr. 5.



Obr. 4 Schéma zařízení pro Hopkinsonův test

Dynamické mechanické vlastnosti se určují z Hopkinsonova testu z elastických pulsů, které jsou snímány dvěma kapacitními snímači. Každá měřicí tyč je opatřena jedním válcovým kapacitním snímačem. Vyhodnocovaný ráz, který zaznamenává první kapacitní snímač (zatěžující puls), je vyvolán impaktorem při dopadu na čelo vstupní tyče. Impaktor je vystřelen pneumatickým kanónem, jenž je součástí zařízení pro Hopkinsonův test. Zatěžující puls vyvolaný impaktorem na vstupní tyči se dále šíří až do rozhraní vstupní tyč – vzorek. Na tomto rozhraní se část zatěžujícího pulsu odrazí zpět (odražený puls) a část prochází dál (prošlý puls) na rozhraní vzorku do výstupní tyče. Každý z pulsů je zaznamenán kapacitními snímači a přenesen do paměťového osciloskopu. Poté následuje zpracování matematickou filtrací a vyhodnocování programem SCOPE na PC. Při Hopkinsonově kompresním testu je předpoklad jednodimenzionálního šíření elastických vln v materiálu tyčí se stejnou mechanickou impedancí [12]. Vyhodnocením testu dostáváme křivky závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci a rychlosti deformace na deformaci pro předmětný materiál a jeho rychlost zatěžování [9].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V návaznosti na níže popsané experimenty jsou zde pro lepší orientaci opětovně uvedeny cíle dizertační práce:

- Vývoj a ověření navrženého přípravku pro tahovou variantu při Hopkinsonově testu.
- Provedení a vyhodnocení fyzikálních experimentů na vybraném materiálu.

- Provedení numerické simulace tahového testu na Hopkinsonově zařízení.
- Porovnání a zhodnocení výsledků.

V současné době má Odbor technologie tváření kovů a plastů na ÚST FSI VUT v Brně k dispozici měřicí zařízení pro testování materiálů, na něž výrazně působí rychlost deformace. Jsou to Hopkinsonův test pro dynamické kompresní a tahové zkoušky (SHP(T)BT – Split Hopkinson Pressure or Tensile Bar Test) a Taylorův test (TAT – Taylor Anvil Test). Přípravek navržený v rámci řešení dizertační práce a vybraná ocel, byly testovány na výše uvedeném Hopkinsonově zařízení.

Předmětný materiál (ocel dle ČSN 41 7240) byl vybrán na základě spolupráce při řešení standardního projektu FSI-11-26. Tento projekt se zabýval vývojem a konstrukcí teplosměnných solárních panelů vyrobených z výše uvedeného materiálu.

4.1 Vstupní testy materiálu

Jako testovací materiál byla vybrána korozivzdorná austenitická chrom niklová ocel s označením ČSN 41 7240 (AISI 304, 1.4301, X5CrNi18-8).

K popsání správného materiálového modelu oceli dle ČSN 41 7240, který je zadáván do numerické simulace, bylo nutné provést vstupní tahové zkoušky za kvazistatických podmínek. Z provedených kvazistatických tahových zkoušek byly zjištěny hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti pro zvolený materiál. Uvedené výsledky uvádí tabulka 1.

Tabulka 1: Výsledky statických tahových zkoušek oceli dle ČSN 41 7240

Vzorek	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	L ₀ [mm]	L _u [mm]	A ₈₀ [%]	V _t [mm/min]	V _{t1} [MPa/s]
1	302,41	587,40	80	118	47,50	3,12	7,97
2	297,03	575,15	80	118	47,50	2,38	7,87
3	302,19	588,02	80	118	47,50	2,31	7,95
4	299,98	581,33	80	118	47,50	2,04	7,81
5	299,68	581,44	80	119	48,75	2,23	7,82
průměr	300,23	582,67	80	118,20	47,75	2,42	7,88

Po provedení transformace grafu závislosti napětí – deformace do logaritmických souřadnic, byla určena i hodnota exponentu deformačního zpevnění $n = 0,48$.

U zvoleného materiálu bylo dále ověřeno jeho chemické složení pomocí energiové disperzní spektroskopie (dále jen EDS) provedené na rastrovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 detektorem EDX v laboratoři Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně, odboru strukturní a fázové analýzy. Výsledné chemické

složení dané oceli, které uvádí tabulka 2, bylo stanoveno na základě pěti měření. Důvodem je, že EDS analýzou lze určit chemické složení pouze z velmi malé oblasti.

Tabulka 2: Výsledky EDS analýzy oceli dle ČSN 41 7240

Si [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]
0,66	17,42	1,45	71,94	8,53

4.2 Ověření správné činnosti Hopkinsonova zařízení

Dříve než byl navržen a vyroben přípravek pro tahové zkoušky pomocí Hopkinsonova zařízení, bylo nutné ověřit správnou činnost tohoto zařízení. Pro ověřovací experimenty byla použita hliníková slitina AA 5083, pro kterou se v dané době prováděly jiné experimenty, a byla právě k dispozici. Ověření správné činnosti Hopkinsonova zařízení spočívalo v provedení dynamického kompresního testu a jeho srovnání s numerickou simulací. Hlavním cílem bylo ověřit, zda kapacitní snímače používané na tomto zařízení pracují správně.

Jak již bylo naznačeno výše, hliníková slitina AA 5083 byla vybrána na základě již předešlých testů, ale hlavně proto, že tato slitina byla jako hlavní testovací materiál v juniorském projektu s označením FSI-J-12-1818, kde autor této dizertační práce byl současně navrhovatelem tohoto projektu. Výše zmíněný juniorský projekt se zabýval ověřením Hopkinsonova kompresního testu numerickou simulací, ale také i ověřením válcových kapacitních snímačů použitých na Hopkinsonově zařízení, které se nachází na FSI VUT v Brně. Juniorský projekt byl úspěšně obhájen a výsledky byly publikovány na mezinárodní konferenci METAL 2013 [13].

Ověření správné funkčnosti zařízení bylo provedeno na základě porovnání výsledků získaných z experimentů a výsledků získaných počítačovou simulací.

Porovnávány byly:

a) Charakteristické rozměry válcových vzorků (průměr a délka) po deformaci. Zjištěné výsledky uvádí tabulka 4. Odchylka skutečných rozměrů od rozměrů získaných simulací nepřesahuje 5 %, což ze statistického hlediska je chyba zanedbatelná a lze říci, že v tomto směru zařízení pracuje správně.

b) Průběhy získaných křivek smluvního deformačního napětí vzorku na deformaci, které jsou uvedeny na obr. 6.

Experimentální křivky závislosti napětí na deformaci byly stanoveny standardní metodikou vyhodnocování Hopkinsonova testu. Křivka získaná ze simulace byla stanovena na základě vyhodnocení časové změny tvaru vzorku. V případě odladění skoků u experimentálních křivek, vzniklých v důsledku okolních negativních vlivů - křivka označená jako "experiment filtration", je patrné, že křivky se sobě blíží. To dokazuje shodu experimentu s počítačovou simulací, a tudíž lze konstatovat, že dané zařízení pracuje správně.

Rozdílné hodnoty konečných (dosažených) deformací zobrazených na obr. 6 jsou způsobeny rozdílnou dobou trvání odraženého a prošlého pulsu. Neboť, jak již bylo řečeno výše, křivka závislosti napětí na deformaci získaná pomocí numerické simulace je stanovena z časové změny tvaru vzorku. U experimentů tohle postihnout nelze, proto odražený a prošlý puls nemá na vyhodnocení prostřednictvím numerické simulace žádný vliv.

Použité válcové vzorky byly o průměru 9 mm a délce 9 mm. Pro numerickou simulaci byl použit program ANSYS LS DYNA. Je to program, který patří k nejpoužívanějším nástrojům pro dynamické rázové děje (nárazy, průstřely atd.). Pro popis chování předmětného materiálu v numerické simulaci byla použita Johnson-Cookova konstitutivní rovnice (1). Parametry této rovnice pro slitinu AA 5083 udává tabulka 3. Parametry Johnson-Cookovy konstitutivní rovnice byly použity z [14]. Pro její použití je nutné znát 5 experimentálně stanovených parametrů pro daný materiál. Jednotlivé parametry zahrnují vliv deformace, rychlosti deformace a teploty.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot [1 - (T^*)^m] \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

kde T^* je stanoveno ze vztahu

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad [-] \quad (2)$$

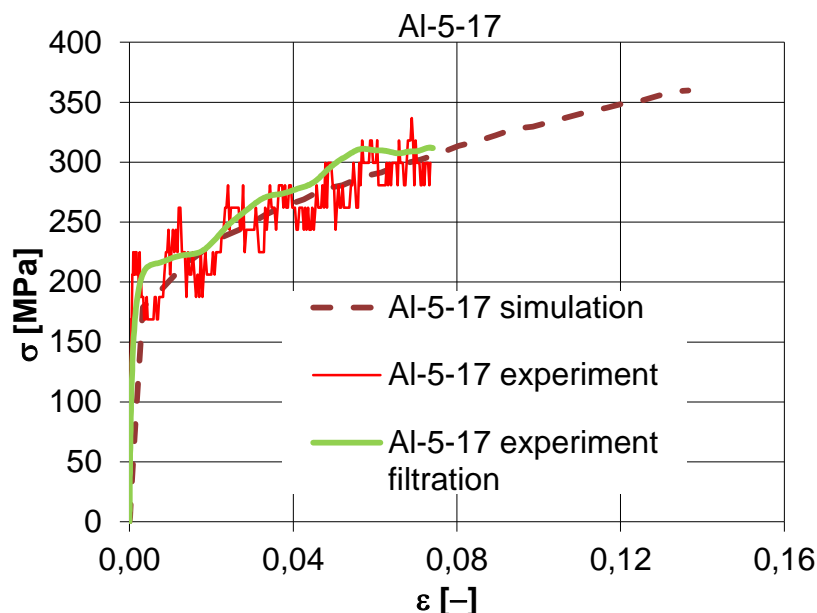
Hodnoty σ_0 , B, C, n, m jsou experimentálně stanovené parametry, kde je σ_0 - mez kluzu [MPa], B - modul zpevnění [MPa], C - koeficient citlivosti na rychlost deformace [-], n - exponent deformačního zpevnění [-], m - teplotní koeficient odpevnění [-], T_0 - teplota okolí [K], T_m - teplota tavení [K], $\dot{\varepsilon}_0$ - referenční rychlost deformace (většinou je rovna 1 s^{-1}).

Tabulka 3: Parametry Johnson-Cookovy rovnice pro slitinu AA 5083 [14]

	σ_0 [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]
AA 5083	167	596	0,001	0,551	0,859

Tabulka 4: Srovnání experimentu a simulace pro slitinu AA 5083 [13]

vzorky slitiny AA 5083		AI-5-17	AI-5-18	AI-5-19	AI-5-20
dopadová rychlost impaktoru [m/s]		22,96	26,21	28,20	29,30
konečná délka [mm]	experiment	8,03	7,73	7,58	7,45
	simulace	7,81	7,61	7,48	7,42
	chyba [%]	2,74	1,55	1,32	0,40
konečný průměr [mm]	experiment	9,57	9,83	9,84	9,92
	simulace	9,62	9,78	9,87	9,91
	chyba [%]	0,52	-0,51	0,30	-0,10



Obr. 5 Křivky závislosti napětí na deformaci pro vzorek Al-5-17 [13]

4.3 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – válcové vzorky

Jak již bylo řečeno, standardním Hopkinsonovým testem jsou zjišťovány mechanické vlastnosti materiálu při kompresním rázovém zatížení. Od roku 2007 probíhá na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně vývoj přípravku, který by se dal na daném zařízení (Hopkinsonově zařízení) využít pro dynamické tahové zkoušky.

Úprava Hopkinsonova zařízení si kladla za úkol navrhnout takové technické řešení, které by podstatně rozšířilo možnosti stávajícího stavu a kromě zjišťování mechanických vlastností materiálu v tlaku by se dané zařízení dalo využívat i pro zjišťování chování materiálu v tahu při rázovém zatížení.

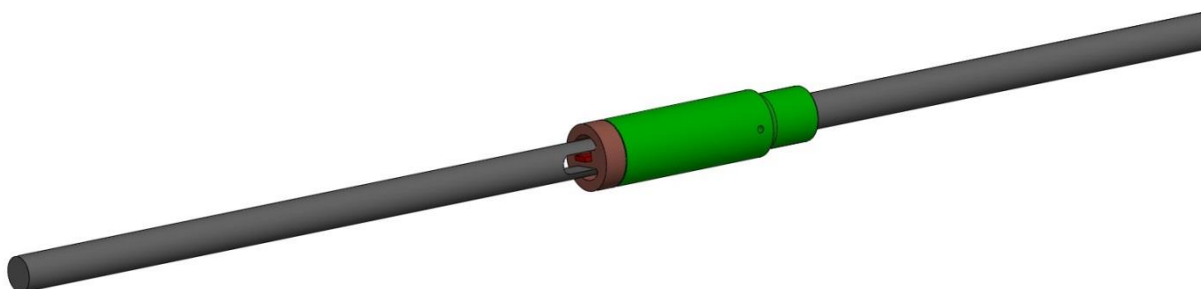
Navržená úprava byla v roce 2010 přijata Úřadem průmyslového vlastnictví jako užitný vzor č. 21472.

4.4 Úprava Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky – ploché vzorky

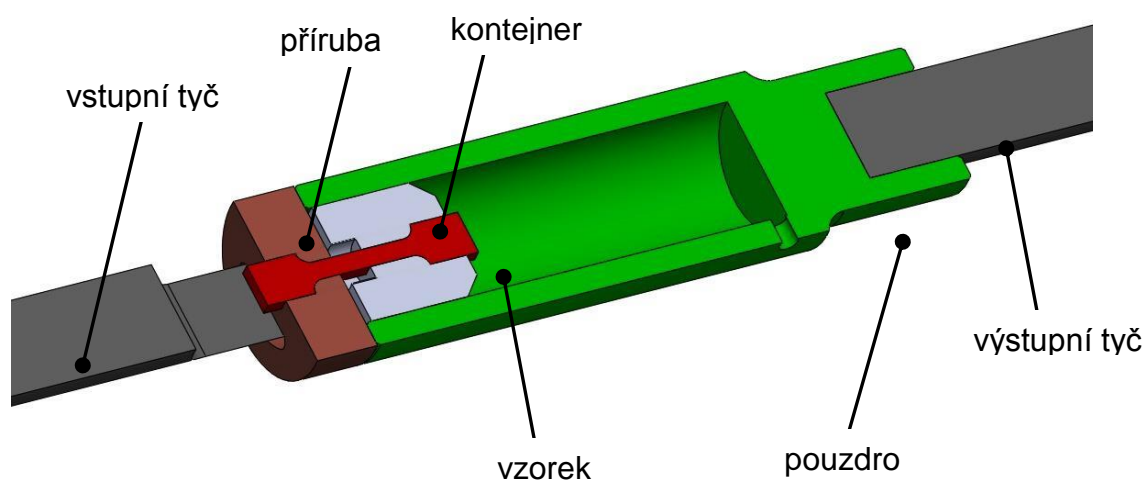
Nevýhodou předcházející úpravy přípravku je, že v něm lze testovat pouze vzorky kruhového průřezu opatřených na koncích závitem. Další nevýhodou je technická a finanční náročnost výroby válcových vzorků. Postup výroby válcových vzorků popisuje například lino [15]. Cílem bylo tedy navrhnout přípravek, který by rozšířil možnost testování i na ploché vzorky.

Navržený přípravek určený k dynamickému testování plochých vzorků, viz obr. 8 a obr. 9, vychází z předešlé koncepce, tj. užitného vzoru č. 21472. Podstata navrženého přípravku spočívá v tom, že v přírubě a v kontejneru je vytvořený obdélníkový průchod, který slouží ke vložení vzorku do přípravku. Dno průchodu leží od společné osy příruby a kontejneru ve vzdálenosti rovné polovině tloušťky vzorku. K přenesení tahového namáhání vzorku slouží symetrická vybrání, která jsou na kontejneru a přírubě, a slouží k uložení konců vzorku [16].

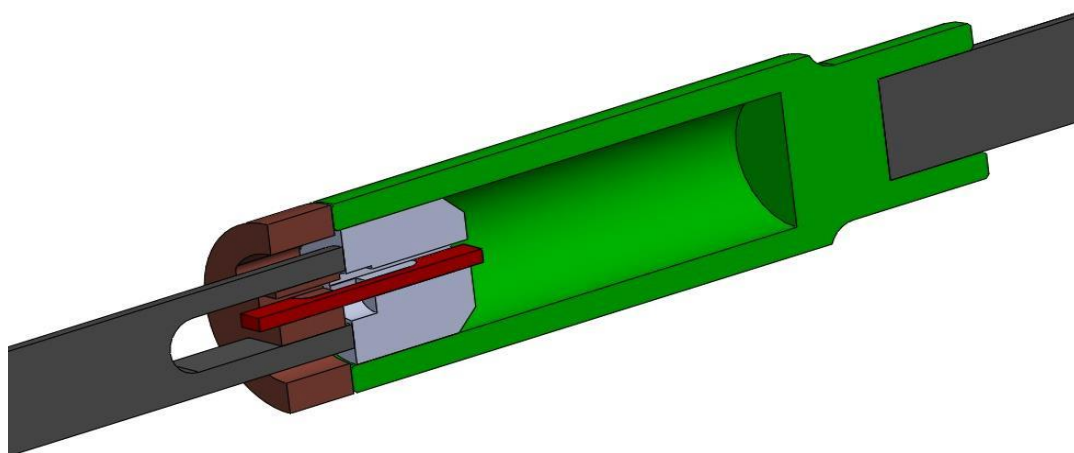
Úprava tahového přípravku navrženého pro ploché vzorky byla v roce 2012 přijata Úřadem průmyslového vlastnictví ČR jako užitný vzor č. 23703 [16]. Navržený přípravek je vyroben z oceli dle ČSN 41 3240 a zušlechtěn na tvrdost 52 HRC.



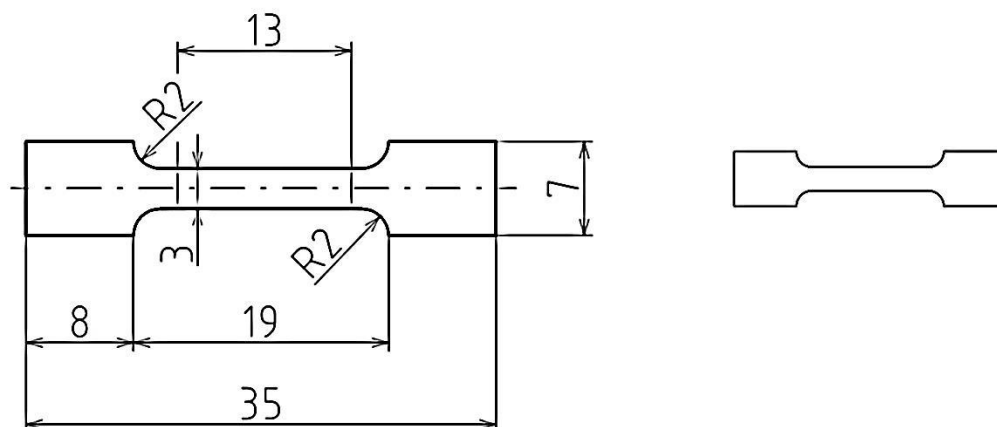
Obr. 6 Upevnění přípravku mezi vstupní a výstupní tyčí



Obr. 7 Detail upnutí plochého vzorku v přípravku



Obr. 8 Osový řez sestaveného přípravku pootočený o 90°



Obr. 9 Náčrtek vzorku pro Hopkinsonův tahový test (vlevo) a v měřítku 1:1 (vpravo)

Takto navržený přípravek k testování plochých vzorků byl ověřován numerickou simulací a prováděnými experimenty. Jako testovaný materiál vzorků pro ověření funkčnosti přípravku byla zvolena korozivzdorná chrom niklová austenitická ocel dle ČSN 41 7240. Vzorky byly vyrobeny z plechu tloušťky 2 mm. Navržený tvar vzorku vychází z podobnosti z klasické (statické) tahové zkoušky. Rozměry plochého vzorku byly stanoveny z předchozí zkušenosti se vzorky válcovými, tzn., bylo nutné uvažovat s navrženou konstrukční úpravou Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky. Výroba vzorků byla provedena pomocí laseru, který se nachází na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Laserové řezání bylo zvoleno z důvodu snadné dostupnosti a ceny pro autora předkládané práce. I když autor této práce byl navrhovatel dvou juniorských projektů VUT, tak náklady spojené s jiným druhem výroby těchto vzorků by přesáhly finanční prostředky těchto projektů. Předmětný materiál byl zvolen z důvodů snadné cenové dostupnosti a také proto, že autor práce se aktivně podílel na řešení projektu FSI-11-26 zabývajícím se tímto materiálem.

4.5 Numerická simulace tahového testu s úpravou pro ploché vzorky

Hlavním cílem numerické simulace tahového přípravku pro testování plochých vzorků bylo nezávislé porovnání s výsledky získanými standardní metodikou Hopkinsonova testu.

Pro numerickou simulaci byla použita školní verze programu ANSYS 14.0, kterou lze bezplatně stáhnout na fakultních stránkách VUT v Brně. Instalační soubor programu ANSYS 14.0 obsahuje různé moduly, které je možné používat při výpočtech statických nebo dynamických úloh, simulace proudění tekutin, přestup tepla. Využití lze také najít v simulaci elektrických obvodů a jejich veličin a v mnoha dalších aplikacích

Aby bylo možné provést numerickou simulaci, bylo nutné nejprve vytvořit geometrický model celé sestavy. K vytvoření modelu sestavy byl použit program SolidWorks 2011 a výsledkem jsou obr. 7, obr. 8 a obr. 9. Dalším krokem bylo uložení sestavy do příslušného datového formátu, tj. formát souboru s příponou

„IGS“, se kterým lze dále pracovat nejen v programu ANSYS. Postup numerické simulace navrženého přípravku sestával ze tří etap.

V první etapě byl využit program s názvem ANSYS Workbench, kde bylo využito modulu Explicit Dynamic (LS-DYNA Export). Jak z názvu vyplývá, tento modul je používán k simulaci rychlých dynamických dějů využívajících explicitní způsob řešení. Zde je proveden tzv. precessing, jehož cílem je provést všechny potřebné kroky, aby bylo možné provést výpočet. V této etapě byly přiřazeny materiálové modely všem dílům sestavy. Dále bylo provedeno vytvoření konečnoprvkové sítě celé sestavy, nastavení počátečních a okrajových podmínek nutných pro výpočet. Po dokončení první etapy byl vygenerován textový soubor s příponou „k“, který je pak použit ve druhé etapě řešení.

Všechny součásti sestavy byly nadefinovány jako dokonale tuhé (rigid), kromě vzorku, který byl definován jako pružný (flexible). Pro dokonale tuhé součásti tedy stačí pouze definovat modul pružnosti v tahu, Poissonovo číslo a hustotu materiálu, tedy hodnoty, které udává tabulka 5.

Tabulka 5 : Fyzikální vlastnosti navrženého přípravku včetně tyčí a impaktoru

	E [MPa]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
ČSN 41 3240	$2,12 \cdot 10^5$	0,3	7800

Materiálový model vzorku byl nadefinován pomocí Johnson-Cookovy konstitutivní rovnice (1). Parametry této rovnice byly stanoveny pomocí numerické simulace. V simulaci byly porovnávány konečné rozměry vzorků po provedení fyzikálního experimentu s rozměry získanými z numerické simulace. Porovnávané rozměry byly: konečná délka vzorku, konečná tloušťka vzorku a šířka v měrné části vzorku. Takto získaný materiálový model pak mohl být použit k nadefinování materiálových vlastností vzorku. Získané parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240 udává tabulka 6.

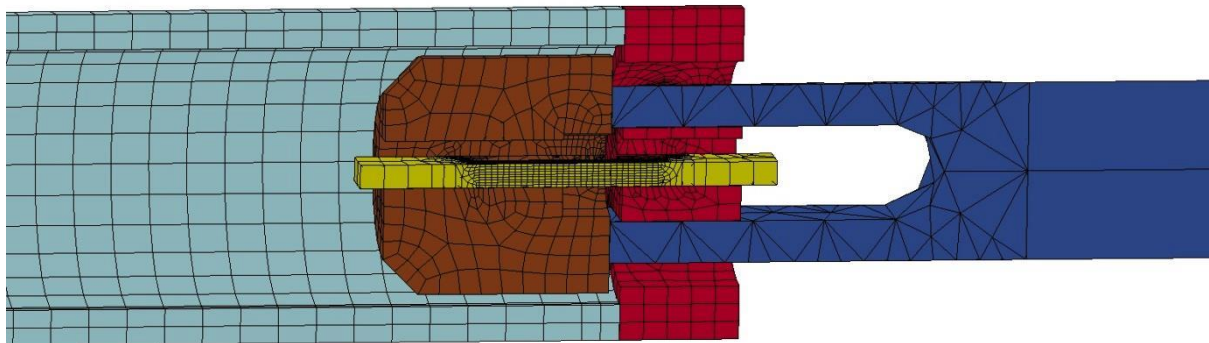
Tabulka 6 : Parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240

	σ_0 [MPa]	B [MPa]	C [-]	n [-]	m [-]	E [MPa]	μ [-]
ČSN 41 7240	302	1100	0,07	0,488	0,95	$1,93 \cdot 10^5$	0,3

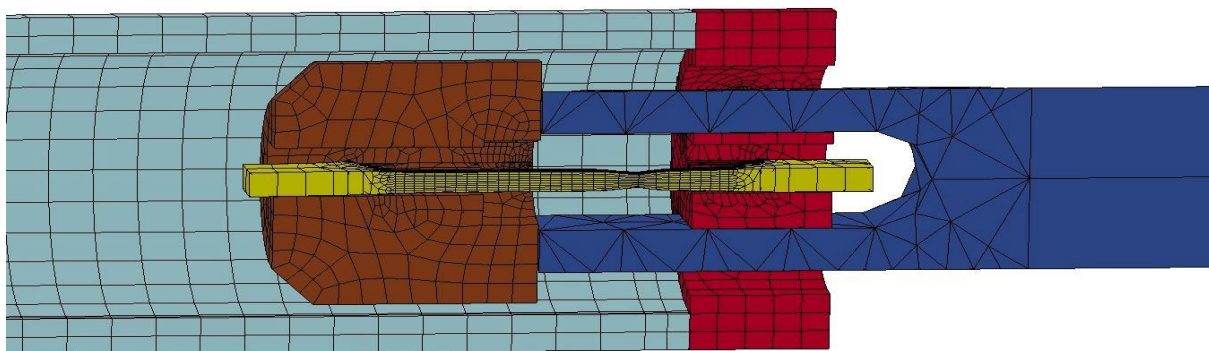
Ve druhé etapě řešení, tzv. processingu, je využíváno souboru s příponou „k“. Tento soubor obsahuje všechny informace nutné k výpočtu zapsané v textovém souboru. Zde je využíváno programu s názvem LS-DYNA Solver, který pracuje s výše uvedeným textovým souborem. Výsledkem druhé etapy je výpočet (zpracování) textového souboru s příponou „k“. Po dokončení výpočtu jsou získané výsledky zpracovány ve třetí etapě.

Třetí etapa, tzv. postprocessing, spočívá v zobrazení a analýze získaných výsledků například způsobem, který je na obr. 11 až obr. 16. K tomuto účelu byl použit program LS-PrePost. Tento program je také součástí instalačního souboru

ANSYS 14.0 nebo je ho možné bezplatně stáhnout z webových stránek (<http://www.lstc.com>), pokud chce uživatel pracovat s aktuální verzí tohoto programu. Pomocí tohoto programu lze například zobrazit průběh vznikající deformace na vzorku během experimentu. Na obrázcích je vyobrazeno, jak dochází na vzorku k homogenní plastické deformaci vzorku až do meze pevnosti materiálu, tj. po tvorbu krčku.



Obr. 10 Osový řez tahovým přípravkem v počátečním stavu

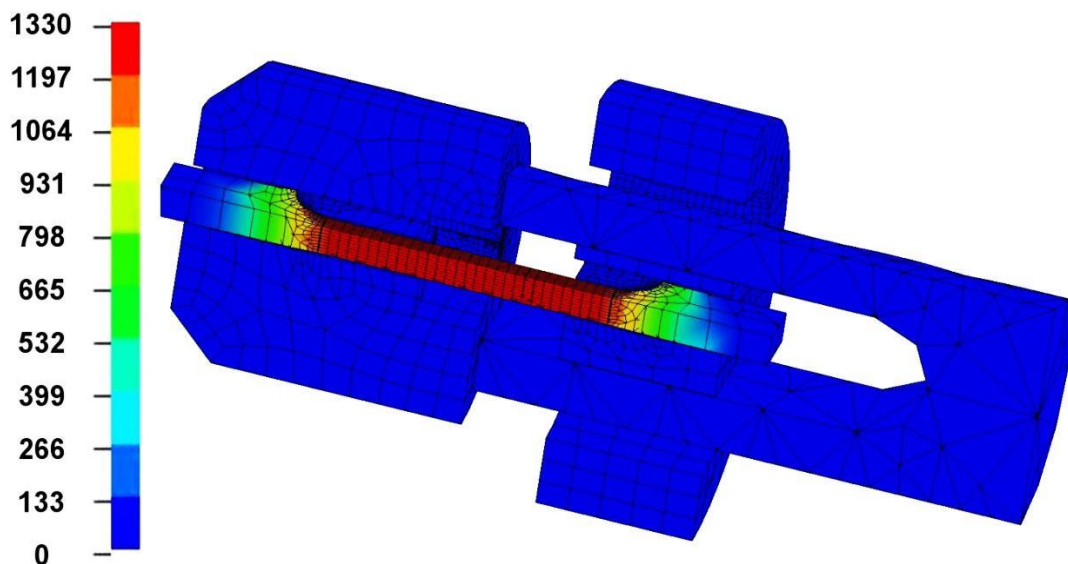


Obr. 11 Osový řez tahovým přípravkem během experimentu

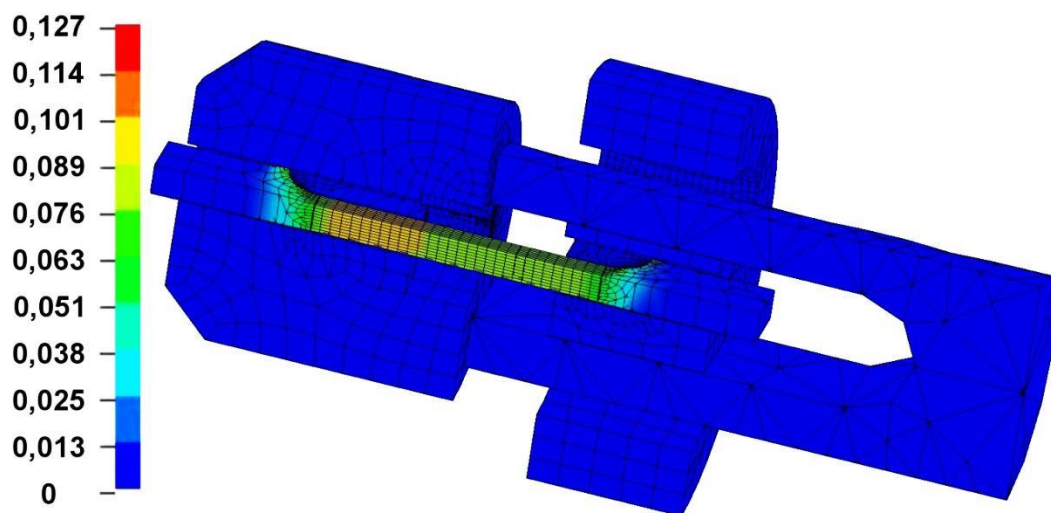
Pokud je nutné zjišťovat okamžik, kdy dochází u vzorku k přetržení, je nezbytné mít správně nastaven model porušení materiálu. V tomto případě byl model porušení nastaven podle Johnson-Cookova kritéria. Je nutné rozlišovat Johnson-Cookovu konstitutivní rovnici a kritérium porušení. Toto kritérium uvádí například Buchar [17].

Při vyhodnocení Hopkinsonova testu je zaznamenáván pouze počáteční rozvoj plastické deformace materiálu vzorku, tzn., že jsou zaznamenány (změřeny) počáteční napěťové pulsy, odpovídající úvodní části rozvoje křivky napětí deformace, viz obr. 17. Proto vyhodnocení výsledků z numerické simulace bylo zaměřeno na tento počáteční rozvoj.

Na obr. 13 a obr. 14 je zachyceno skutečné efektivní napětí a efektivní plastická deformace vzorku právě v okamžiku průchodu napěťového pulsu. V tomto okamžiku dochází ke konečnému dosednutí vzorku mezi přírubou a kontejnerem.

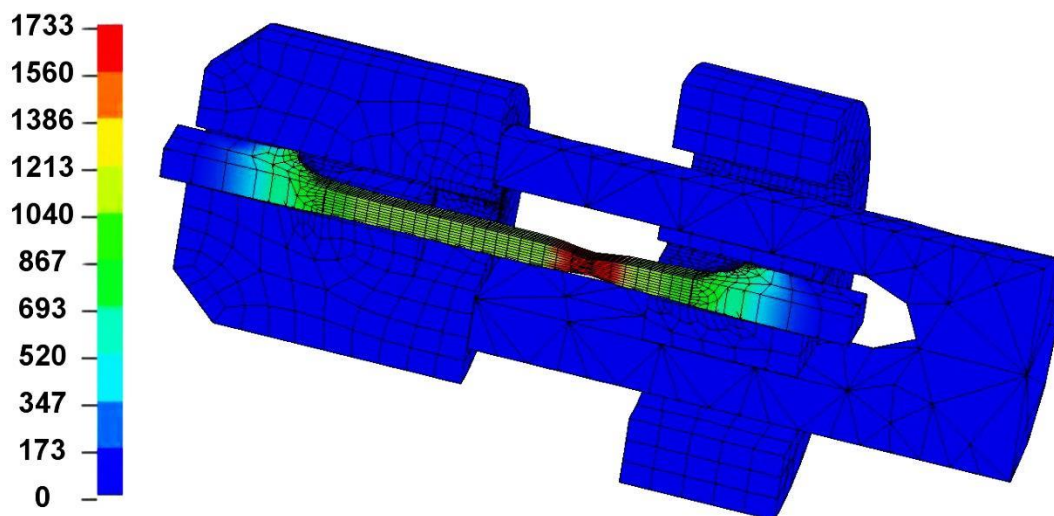


Obr. 12 Skutečné efektivní napětí-von Mises [MPa] po průchodu prvního zatěžovacího pulzu ze vstupní tyče – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s

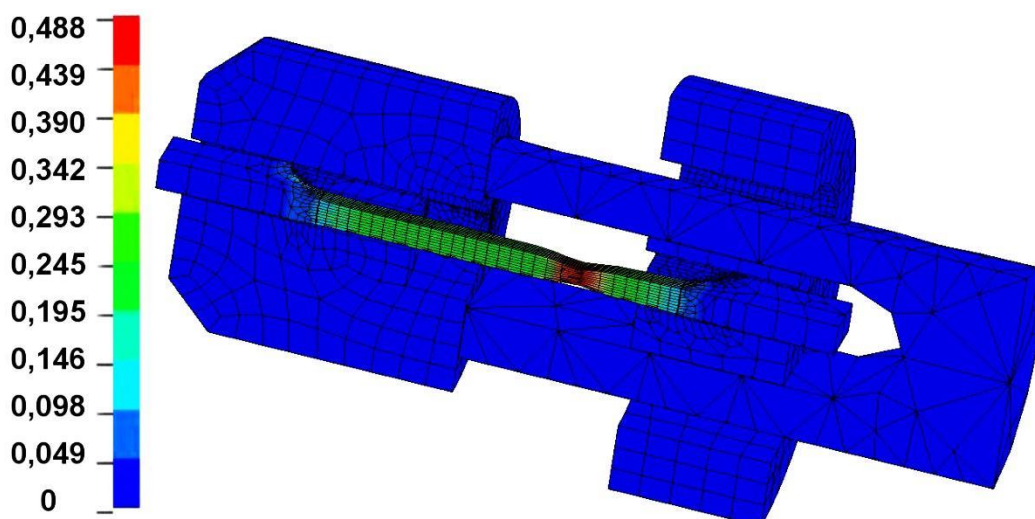


Obr. 13 Skutečná efektivní plastická deformace po průchodu prvního zatěžovacího pulzu ze vstupní tyče – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s

Rozložení skutečného efektivního napětí a skutečné efektivní deformace v okamžiku vzniku krčku je zobrazeno na obr. 15 a obr. 16.



Obr. 14 Skutečné efektivní napětí-von Mises [MPa] v okamžiku tvorby krčku – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s



Obr. 15 Skutečná efektivní plastická deformace v okamžiku tvorby krčku – dopadová rychlost impaktoru 20,5 m/s

Správnost výpočtu v rámci simulace daného procesu dokumentuje porovnání obr. 16 a obr. 23, kde na obr. 23 je zachycen skutečný testovaný vzorek po přetržení.

4.6 Provedení experimentů s navrženou úpravou pro ploché vzorky

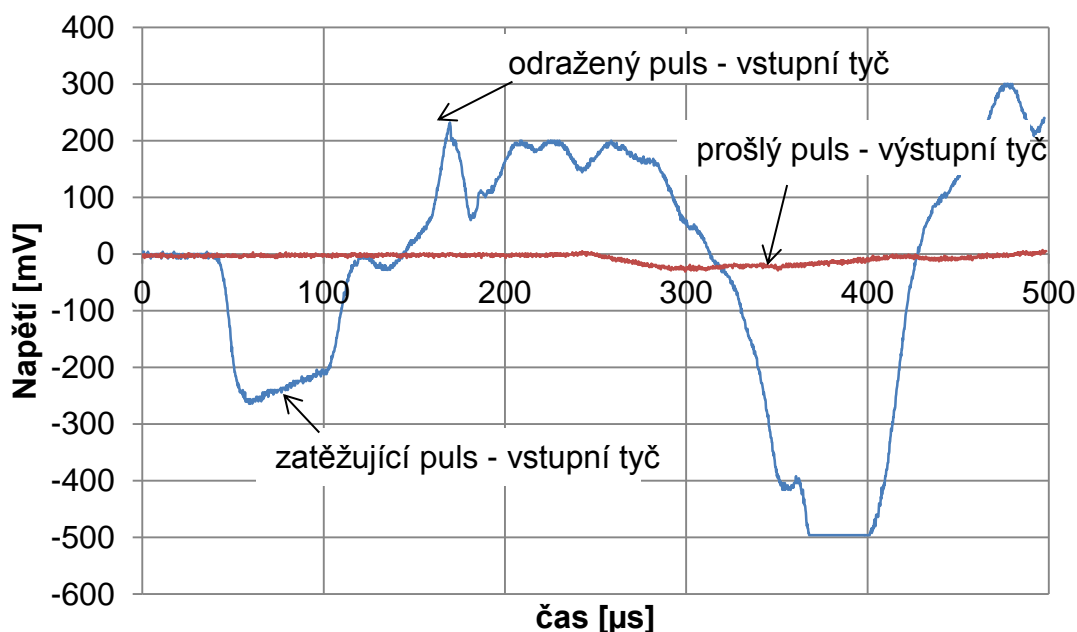
Při provádění tahových zkoušek byl použit impaktor o délce 150 mm. Tahový přípravek byl testován v rozmezí dopadových rychlostí impaktoru od 14 do 24 m/s. Provedenými experimenty bylo zjištěno, že hraniční dopadové rychlosti impaktoru při testování předmětné oceli dle ČSN 41 7240 a tloušťky 2 mm jsou mezi 20 a 21 m/s. Při vyšších dopadových rychlostech impaktoru docházelo k nadměrnému

opotrebení příruby a vstupní tyče, neboť přebytkovou rázovou energii po přetržení vzorku nelze utlumit. Proto testování navrženého přípravku probíhalo v rozmezí těchto hraničních hodnot.

Cílem experimentů bylo otestovat navržený tahový přípravek při dopadové rychlosti impaktoru 20 m/s, čemuž přibližně odpovídá doba plnění vzdušníku asi 20 s.

Na výsledky prováděných experimentů měly vliv různé faktory, jako jsou netěsnost vzdušníku během plnění, čas spouštění a zastavení plnění, tření mezi povrchem impaktoru a vodící lištou, časová prodleva mezi koncem plnění a urychlením impaktoru. Důsledkem působení těchto faktorů bylo obtížné dodržet stejnou hodnotu požadované dopadové rychlosti při každém experimentu. Z toho tedy vyplývá, že každý provedený experiment je ze statistického hlediska neopakovatelný.

V některých případech byl záznam nekvalitní (např. šumy z elektrické sítě, disperze), či dokonce nebyl získán vůbec. Pro ucelení představy je na obr. 17 vyobrazen příklad kvalitního záznamu získaného z provedeného experimentu, který je možno dále zpracovávat.



Obr. 16 Záznam z tahové zkoušky vzorku TAH 07-2 při dopadové rychlosti impaktoru 20,22 m/s

4.7 Vyhodnocení provedených experimentů

V této kapitole jsou uvedeny výsledky experimentů, které byly provedeny podle základního principu vyhodnocování Hopkinsonova testu. Na základě provedených experimentů byly získány závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci a rychlosti deformace na deformaci, viz obr. 19, obr. 20. Celkem bylo provedeno 20 zkoušek za použití navrženého tahového přípravku a vzorků z oceli dle ČSN 41 7240. Jelikož dizertační práce se zabývá ověřením a možnostmi dynamických tahových zkoušek prováděných na Hopkinsonově zařízení, bylo nutné

zvolit optimální parametry nastavení testu. Hlavními parametry nastavení byly dopadová rychlost impaktoru a velikost impaktoru. Použitý impaktor byl 150 mm dlouhý o průměru 19 mm.

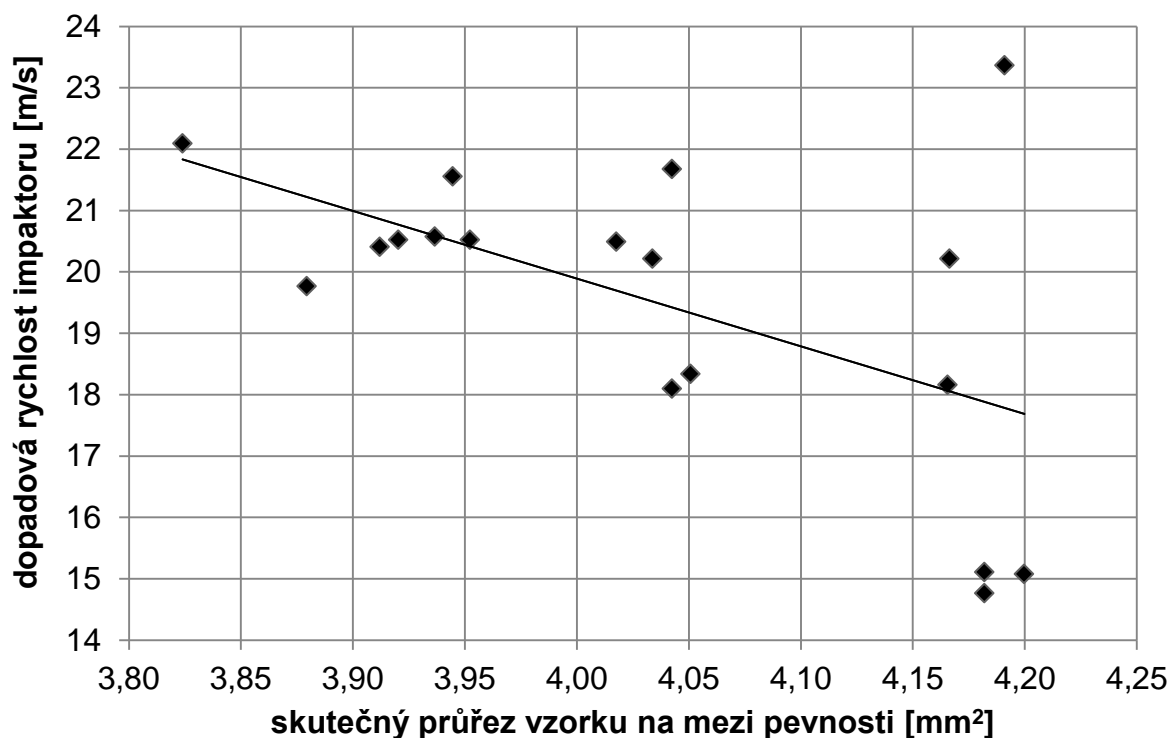
Jak bylo zdůvodněno v předchozí kapitole, testy byly prováděny při rychlosti impaktoru okolo 20 m/s. Nutno poznamenat, že tyto počáteční podmínky byly nastaveny i v numerické simulaci.

Na základě uskutečněných experimentů byla provedena dvě základní vyhodnocení.

V prvním případě byla zkoumána závislost velikosti dopadové rychlosti impaktoru na geometrii vzorku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu. Podmínkou bylo proměřit konečnou měrnou délku vzorku a jeho průřez (šířku a tloušťku), a to v blízkosti počátku krčku (pokud krček nastal) či v libovolném místě měrné délky (pokud krček nenastal). Jako mez pevnosti byla brána hodnota, která byla získána z numerické simulace. Mez pevnosti předmětného materiálu byla stanovena z numerické simulace proto, že lze z ní stanovit celý průběh deformačního napětí v čase. Z experimentu tuto hodnotu meze pevnosti stanovit nebylo možné, protože na rozdíl od simulace experiment je schopen zachytit pouze počáteční rozvoj deformačního napětí.

Naměřené hodnoty geometrie vzorku a dopadové rychlosti impaktoru byly zpracovány, dle kterých byl následně vytvořen graf závislosti dopadové rychlosti impaktoru na skutečném průřezu vzorku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu. Graf dané závislosti je v této práci prezentován jako obr. 18. Na základě tohoto měření a následně i grafu na obr. 18 lze konstatovat, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru klesá skutečný průřez vzorku na mezi pevnosti. Jisté odchylky od tohoto tvrzení jsou způsobeny náhodnými vlivy, které ovlivňují Hopkinsonův test a které již byly dříve zmíněny.

Druhé vyhodnocení experimentů spočívalo ve stanovení maximální síly, respektive napětí dosaženého během experimentu. Tuto hodnotu ovšem nelze stanovit bez kvalitního záznamu závislosti změny elektrického napětí kapacitního snímače na čase (příklad na obr. 17). Proto bylo nutné z celkem 20 zkoušek vybrat pouze ty, jejichž záznam byl vhodný k dalšímu zpracování. Hodnota maximální síly/napětí stanovená experimentálně byla posléze porovnávána s toutéž hodnotou získanou simulací. Toto vyhodnocení je uvedeno a okomentováno níže, v kapitole 4.8.

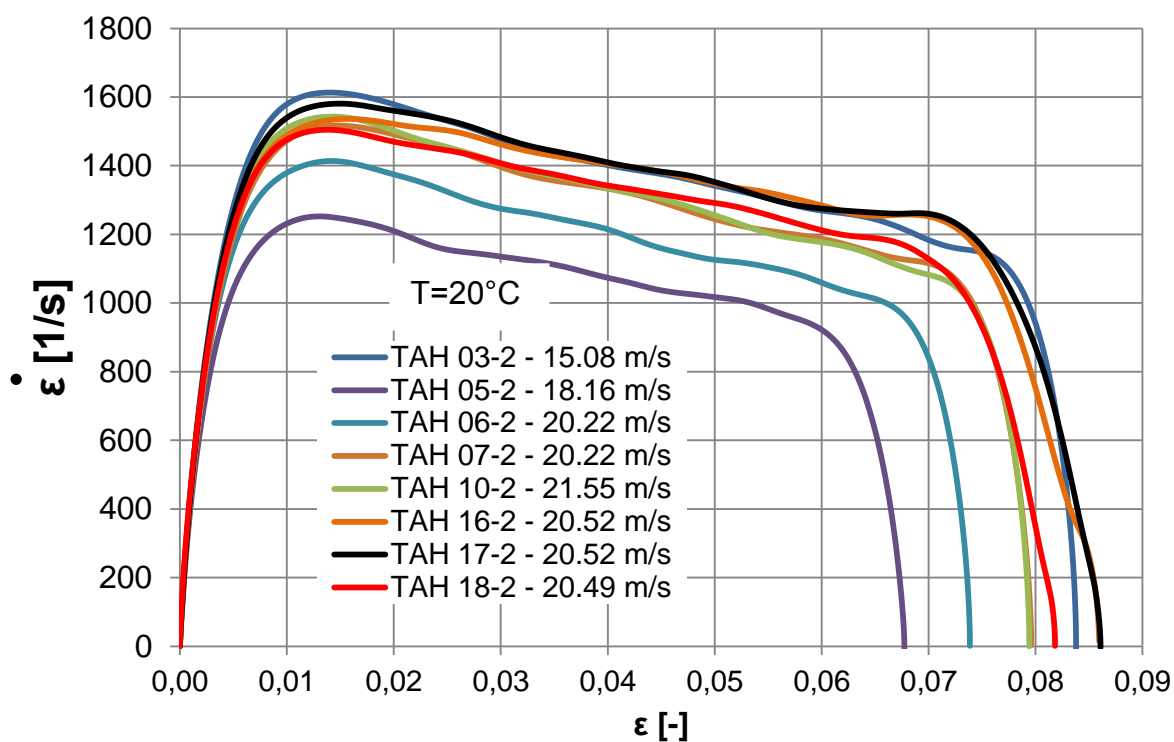


Obr. 17 Závislost skutečného průřezu vzorku na dopadové rychlosti impactoru

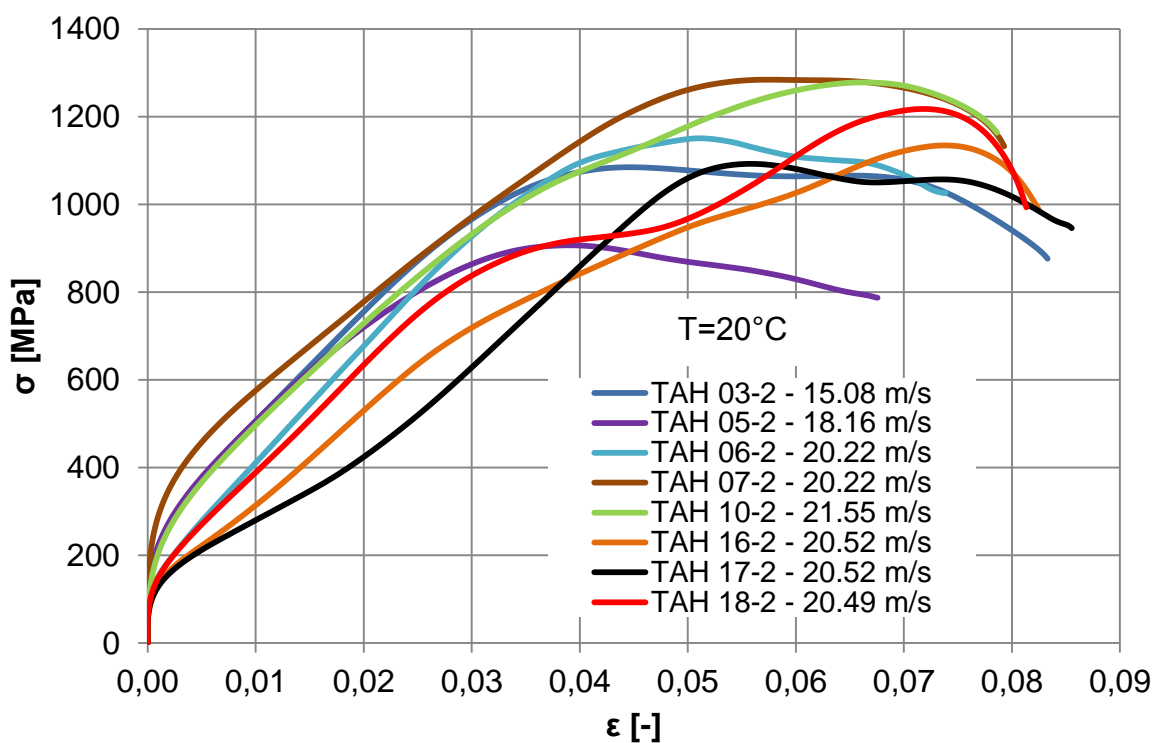
Z 20 provedených testů byly vybrány vzorky s odpovídající kvalitou záznamu. Pro tyto vzorky byla vytvořena tabulka 7, která je rozšířena o hodnotu maximální tahové síly působící na jednotlivé vzorky. Z těchto vybraných záznamů byly vyhodnoceny křivky závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci vzorku a také křivky závislosti rychlosti deformace na deformaci vzorku. K jejich tvorbě byla použita standardní metodika vyhodnocení pro Hopkinsonův test. Vykreslení těchto křivek je znázorněno na obr. 19 a obr. 20. Průběhy křivek dokumentují, že se zvyšující se rychlostí deformace narůstá deformační odpor materiálu.

Tabulka 7: Vybrané vzorky s odpovídající kvalitou záznamu pro vyhodnocení

označení vzorku	TAH 03-2	TAH 05-2	TAH 06-2	TAH 07-2	TAH 10-2	TAH 16-2	TAH 17-2	TAH 18-2
dopadová rychlost [m/s]	15,08	18,16	20,22	20,22	21,55	20,52	20,52	20,49
Maximální síla – záznam osciloskop [N]	6504	5454	6900	7704	7668	6804	6552	7302



Obr. 18 Graf závislosti rychlosti deformace na deformaci – ocel dle ČSN 41 7240



Obr. 19 Graf závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci – ocel dle ČSN 41 7240

4.8 Porovnání výsledků experimentu a numerické simulace

Cílem provedených experimentů a numerické simulace bylo zhodnocení funkčnosti navrženého tahového přípravku. Zhodnocení funkčnosti bylo provedeno na základě porovnání skutečných deformačních napětí z experimentu a numerické simulace. Jelikož testováním na Hopkinsonově zařízení je možné získat pouze počáteční rozvoj plastické deformace testovaného materiálu, muselo být porovnání výsledků rozděleno do více etap.

V první etapě byly změřeny konečné rozměry vzorků, tj. měrná délka, tloušťka, šířka atd. Na základě těchto hodnot mohl být posléze správně nadefinován materiálový model vzorku. Pro materiálový model vzorku byla zvolena Johnson-Cookova konstitutivní rovnice. K správnému určení konstant předmětné rovnice bylo prováděno porovnání konečných rozměrů vzorků z experimentu a simulace. Výsledek porovnávání konečných rozměrů vzorků z experimentu s numerickou simulací vedl ke stanovení materiálového modelu vzorku, který udává tabulka 6. Na základě těchto získaných hodnot je pak snadné určit chování vzorku po celou dobu trvání experimentu.

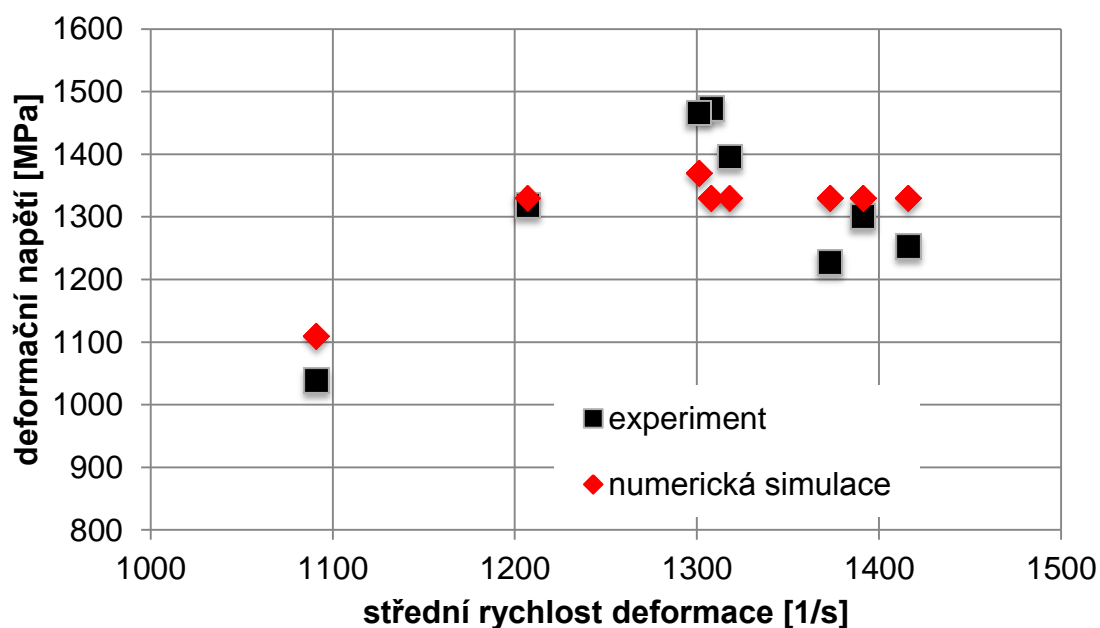
Druhá etapa spočívala v určení maximálního skutečného deformačního napětí získaného na základě provedení experimentu a numerické simulace. Velikost maximálního skutečného deformačního napětí je možné z experimentu v konečném důsledku zjistit, ale je to zkomplikované tím, že se jedná o velmi rychlý proces zatěžování (cca 100 mikrosek) a navržený přípravek neumožňuje pozorovat vzorek během experimentu. Nebylo proto možné v průběhu zkoušky získávat průběžné informace o změnách rozměrů vzorku, nutných pro výpočet velikosti skutečného napětí.

Co ale bylo možné zachytit, byl průběh síly při počátečním rozvoji deformace. Jelikož z první etapy je známé chování vzorku během experimentu (numerická simulace), bylo tedy možné určit skutečný průřez vzorku v okamžiku působení maximální síly při počátku zatěžování. Z těchto hodnot pak bylo možné stanovit hodnoty maximálního skutečného napětí, ale jedná se o napětí na počátku zatěžování vzorku. Toto porovnání skutečných napětí získaných z experimentu a z numerické simulace na vybraných vzorcích zobrazuje tabulka 8 a je vyobrazeno na obr. 21. Maximální relativní chyba experimentu od numerické simulace je do 10 %. Tato hodnota je v inženýrských výpočtech brána za ještě přijatelnou. Výsledkem tedy je, že navržený přípravek pro tahové zkoušky plochých vzorků je funkční a jeho výsledky jsou použitelné.

Je nutné ale zmínit fakt, že numerická simulace nemůže postihnout všechny vlivy, které jsou při reálném experimentu. Jak zde již bylo několikrát zmíněno, jako materiálový model vzorku byla vybrána Johnson-Cookova konstitutivní rovnice. Ta zahrnuje vlivy deformace, rychlosti deformace a teploty. Nezahrnuje ale vliv struktury vzorku během výrazného působení rychlosti deformace. Obecně platí, že ocel dle ČSN 41 7240 je náchylná na transformační změnu austenitu na martenzit, která je vyvolána deformací vzorku.

Tabulka 8: Zjištěné hodnoty pro vybrané vzorky

název vzorku	dopadová rychlost impaktoru [m/s]	skutečné napětí z experimentu [MPa]	skutečné napětí z numerické simulace [MPa]	max. skutečné napětí na mezi pevnosti – numerická simulace [MPa]	střední rychlost deformace - experiment [1/s]
TAH 03 - 2	15,08	1227	1330	1580	1373
TAH 05 - 2	18,16	1039	1110	1605	1091
TAH 06 - 2	20,22	1319	1330	1710	1207
TAH 07 - 2	20,22	1473	1330	1710	1308
TAH 10 - 2	21,55	1466	1370	1742	1301
TAH 16 - 2	20,52	1301	1330	1710	1391
TAH 17 - 2	20,52	1253	1330	1710	1416
TAH 18 - 2	20,49	1396	1330	1710	1318



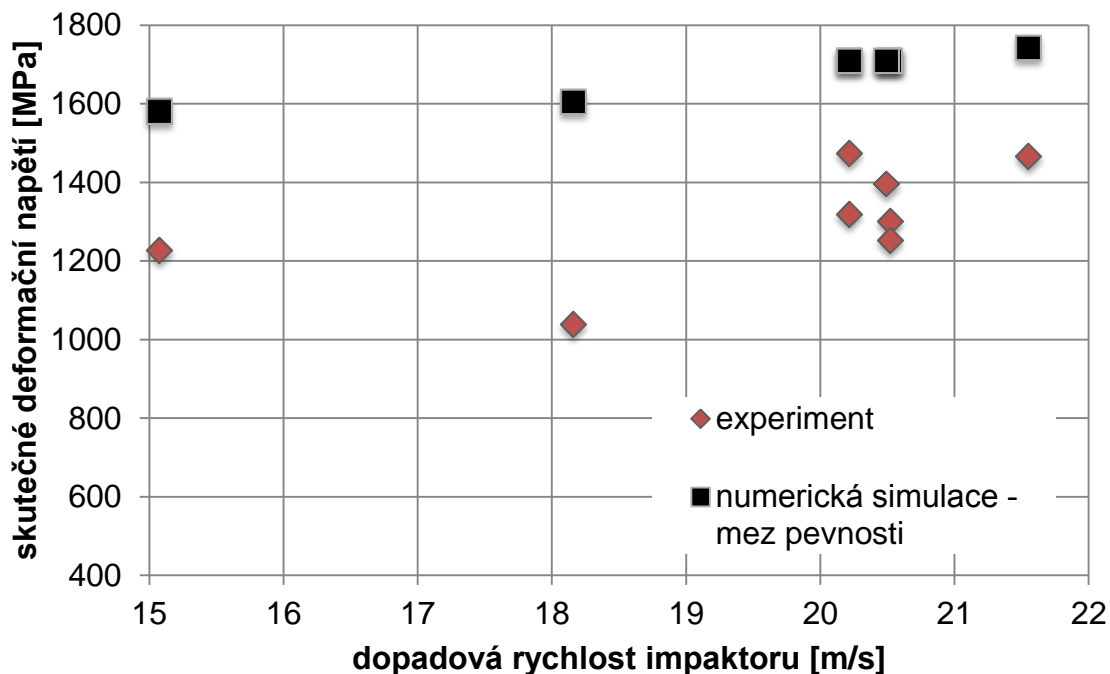
Obr. 20 Závislost střední rychlosti deformace na skutečném deformačním napětí

Třetí etapa byla zaměřena na získání maximálních hodnot skutečného deformačního napětí (meze pevnosti) vzorku. Aby bylo možné určit tyto maximální hodnoty skutečného napětí (mez pevnosti), muselo být použito jen numerické simulace. Jak zde již bylo několikrát zmíněno, tak po obdržení pulsů z experimentu lze získat pouze počáteční rozvoj plastické deformace, nikoliv celý průběh. Je to dáno rozdílnou dobou trvání jednotlivých pulsů, viz obr. 17. Při správném určení materiálového modelu vzorku, viz tabulka 6, bylo tedy možné stanovit maximální hodnoty skutečného deformačního napětí pro kteroukoliv dopadovou rychlost

impaktoru. Tyto maximální hodnoty skutečného deformačního napětí, které udává tabulka 8, odpovídají mezi pevnosti oceli dle ČSN 41 7240 pro jednotlivé dopadové rychlosti impaktoru. Hodnoty skutečného napětí na mezi pevnosti jsou vyobrazeny na obr. 22. Současně jsou na tomto obrázku zaznamenány hodnoty získané z experimentu, tj. jaké maximální hodnoty bylo možné určit z experimentu. Protože při tomto porovnání výsledků bylo snahou využívat co nejvíce informací z experimentů, byla závislost skutečného deformačního napětí vynesena na dopadové rychlosti impaktoru. Je to proto, že dopadová rychlost impaktoru při provedení experimentu a numerické simulaci je přesně určena a také přímo souvisí s rychlostí deformace vzorku. Střední rychlost deformace pro tento okamžik (max. napětí – napětí na mezi pevnosti) není možné z experimentu přesně stanovit z důvodů, které jsou popsány výše a jsou také vyobrazeny na obr. 17.

Pro srovnání byly také provedeny statické tahové zkoušky. Bylo zjištěno, že skutečné napětí na mezi pevnosti pro ocel dle ČSN 41 7240 je 935 MPa. Tato hodnota byla stanovena obecně známým přepočtem smluvního na skutečné napětí vzorku, který uvádí například Petruželka [18].

Z výsledků, které jsou na obr. 22, tedy plyne, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru deformační napětí materiálu vzorku mírně narůstá. Je tedy možné tvrdit, že dopadová rychlost impaktoru a s tím související i rychlost deformace mají vliv na mechanické chování předmětného materiálu.



Obr. 21 Závislost dopadové rychlosti impaktoru na skutečném deformačním napětí materiálu vzorku

Čtvrtá etapa byla zaměřena na porovnání ostatních veličin získaných z tahové zkoušky, tj. tažnosti a kontrakce. Pro stanovení těchto hodnot bylo využito

počátečních a konečných rozměrů vzorků, získaných z experimentů provedených za různých hodnot dopadové rychlosti impaktoru. Porovnání počáteční a konečné délky vzorku je na obr. 23. Pro kontrolu bylo provedeno ověření konečných délek vzorků získaných z experimentů a z numerické simulace. Výsledky udává tabulka 9. Lze tedy konstatovat, že relativní chyba výsledků experimentů a numerické simulace nepřesahuje 5 %. Jak již bylo zmíněno výše, relativní chyba pohybující se kolem 5 % je pro inženýrskou praxi přijatelný výsledek. Porovnání konečných délek vzorků je tedy další ověření, že stanovený materiálový model vzorku, tj. parametry Johnson-Cookovy rovnice pro ocel dle ČSN 41 7240, je správný. Metodika stanovení tažnosti a kontrakce včetně získaných výsledků je podrobně uvedena v následující kapitole 4.9.



Obr. 22 Srovnání vzorků před a po provedení dynamického tahového testu.

Tabulka 9: Porovnání celkových délek vzorků z experimentu a numerické simulace

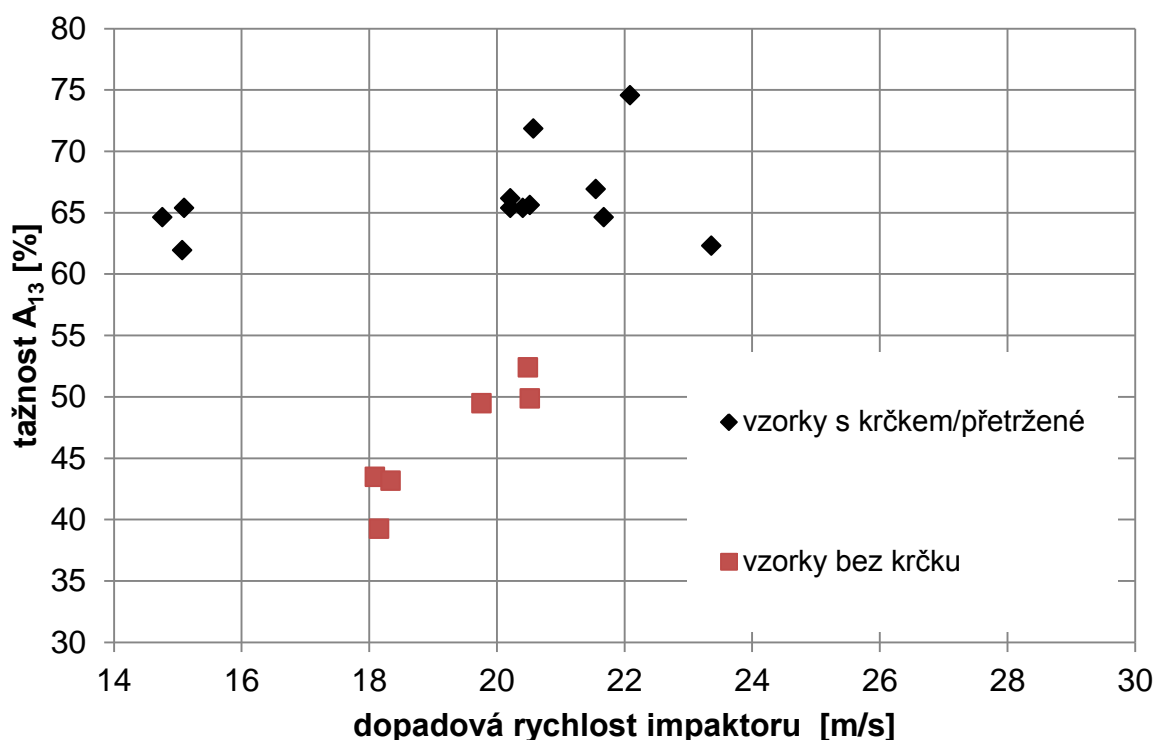
označení vzorku		TAH 03-2	TAH 05-2	TAH 06-2	TAH 07-2	TAH 10-2	TAH 16-2	TAH 17-2	TAH 18-2
Konečná délka vzorku [mm]	Experiment	43,00	42,80	43,60	43,50	43,70	42,90	43,50	43,70
	Simulace	44,97	44,65	44,97	44,97	43,82	44,97	44,97	44,97
	Rel. chyba [%]	4,38	4,14	3,04	3,27	0,27	4,60	3,27	2,82

4.9 Další výsledky získané z provedených experimentů

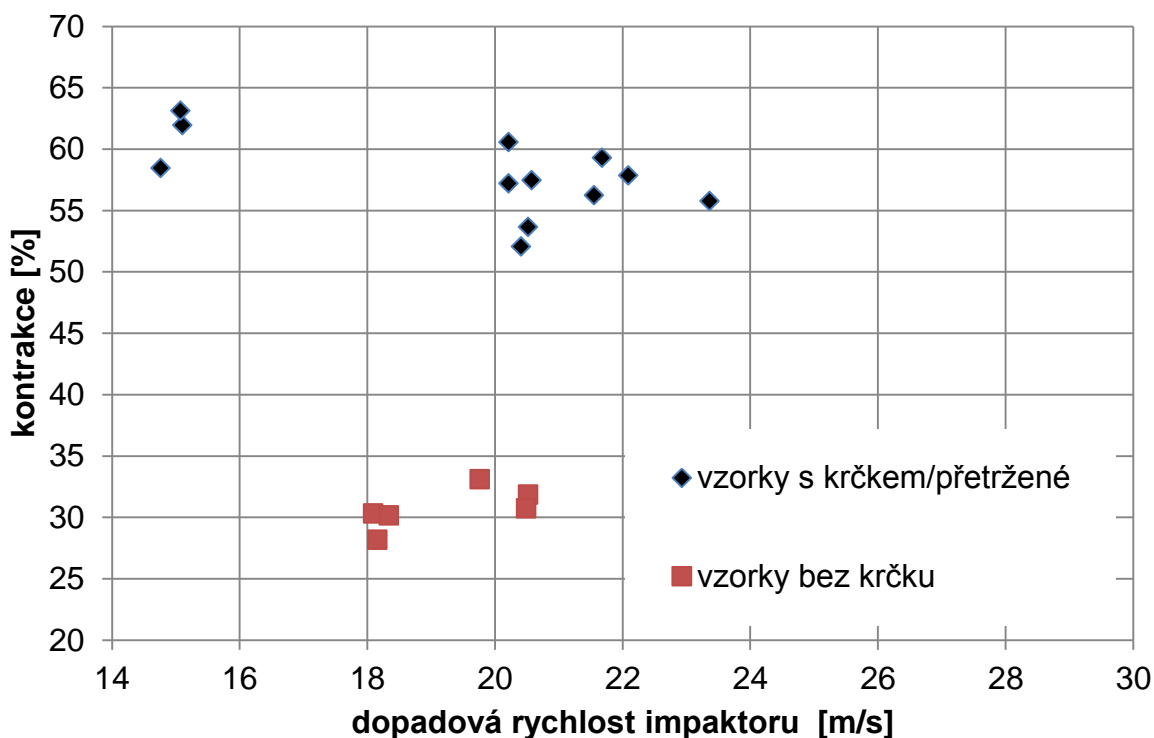
V tomto případě byly dále z experimentů vyhodnocovány další charakteristiky týkající se tahové zkoušky, tj. tažnost a kontrakce. Při tomto vyhodnocení byly nejprve vzorky rozděleny podle toho, zda na nich během experimentu vznikl či nevznikl „krček“. Po té bylo provedeno na těchto vzorcích stanovení tažnosti a kontrakce podle vztahů, které uvádí například Petruželka [18].

Na základě tohoto rozdělení bylo uskutečněno grafické srovnání tažnosti a kontrakce v závislosti na dopadové rychlosti impaktoru, viz obr. 24 a obr. 25. Při stanovení tažnosti se vycházelo ze základní měrné délky vzorku 13 mm. Kontrakce byla stanovena ze základního průřezu měrné části vzorku, tj. tloušťky 2 mm a šířky 3 mm. Základní měrná délka a geometrie vzorku jsou na obr. 10.

Z provedených vyhodnocení tažnosti a kontrakce nelze jednoznačně stanovit, zda stanovené hodnoty pro materiál dle ČSN 41 7240 jsou ovlivněny dopadovou rychlostí impaktoru, potažmo rychlostí deformace. Je tedy možné se z daných hodnot domnívat, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru se zvyšuje i tažnost. Aby bylo možné jednoznačně vyslovit jasný závěr, jaký má vliv dopadová rychlost na tyto hodnoty, muselo by být provedeno více experimentů, které by pokryly větší rozsah dopadových rychlostí impaktoru, než je tomu zde. Toto tvrzení je možné doložit obr. 24 a obr. 25, kde je jasně patrné, že dopadová rychlost impaktoru byla nejčastěji okolo 15 m/s a poté nejvíce okolo 21 m/s. Zde je nutné připomenout, že tyto hodnoty dopadových rychlostí byly zvoleny z důvodů ověření navrženého tahového přípravku pro Hopkinsonovo zařízení, nikoliv k určování vlivu dopadové rychlosti impaktoru na tažnost a kontrakci oceli dle ČSN 41 7240.



Obr. 23 Graf závislosti tažnosti na dopadové rychlosti impaktoru



Obr. 24 Graf závislosti kontrakce na dopadové rychlosti impaktoru

5 ZÁVĚRY

Již v roce 2010 bylo na FSI VUT v Brně vyvinuto zařízení, kterým bylo možné provádět tahové zkoušky válcových vzorků. Protože výroba válcových vzorků, určených pro tyto účely, byla finančně náročná, bylo snahou navrhnout a ověřit možnou úpravu Hopkinsonova zařízení k provádění tahových zkoušek s jinými než válcovými vzorky.

Cílem dizertační práce bylo navržení a ověření přípravku, který slouží k provádění tahových zkoušek na Hopkinsonově zařízení, kde je zkušební vzorek vyroben z plechu. Pro návrh tvaru vzorku se vycházelo z podobnosti klasické (statické) tahové zkoušky. Rozměry plochého vzorku byly stanoveny na základě předchozí zkušenosti se vzorky válcovými, tj. bylo nutné uvažovat s navrženou konstrukční úpravou Hopkinsonova zařízení pro tahové zkoušky. Navržený přípravek lze používat pro takové materiály, u kterých protažení vzorku ve směru podélné osy nepřesáhne 10 mm.

K ověření funkčnosti dané úpravy byla vybrána korozivzdorná austenitická, chrom niklová ocel dle ČSN 41 7240 o tloušťce 2 mm. Předmětný materiál byl vybrán na základě spolupráce na řešení standardního projektu FSI-11-26. Projekt se zabýval konstrukcí teplosměnných solárních panelů.

V rámci řešení dizertační práce byly na nově navrženém přípravku provedeny tahové zkoušky celkem 20 plochých vzorků. Vzorky byly vyrobeny laserovým řezáním na Ústavu přístrojové techniky AV ČR. Při testování byl použit impaktor délky 150 mm (ozn. I 150B). Testování probíhalo při různých dopadových

rychlostech impaktoru v rozsahu od 14 do 24 m/s. Bylo zjištěno, že maximální dopadová rychlost impaktoru při použití výše zmíněného materiálu je okolo 21 m/s. Jakmile impaktor přesáhl tuto hraniční rychlost, docházelo k nadměrnému opotřebení navrženého přípravku a z části i zatěžující tyče. Důvodem je, že zbývající rázovou energii, která nebyla spotřebována k deformaci vzorku, nelze jiným způsobem utlumit. Testování bylo proto převážně zaměřeno na dopadovou rychlost impaktoru pohybující se kolem hodnoty 20 m/s. Přesná hodnota dopadové rychlosti nemůže být dodržena u všech experimentů stejná, a to z důvodů vlivu vnější a vnitřní balistiky impaktoru, a dále také netěsnosti vzdušníku během plnění, doby spouštění a zastavení plnění, tření mezi povrchem impaktoru a vodící lištou, časové prodlevy mezi koncem plnění a urychlením impaktoru.

U všech přetvořených vzorků byly následně změřeny hlavní rozměry (celková délka vzorku, konečná délka měrné části, konečná tloušťka a šířka vzorku). Na základě těchto rozměrů byly následně stanoveny parametry jako konečný průřez vzorku, geometrie „krčku“ na vzorku, tažnost a kontrakce.

Hodnota konečného průřezu vzorku byla využita k nastavení správného materiálového modelu v numerické simulaci, tj. konstitutivní Johnson-Cookovy rovnice. Nalezení správných parametrů spočívalo v porovnávání konečné geometrie vzorku získané z experimentu s geometrií získanou z numerické simulace.

Konečný průřez a délka sloužily ke stanovení tažnosti a kontrakce. Z výsledných hodnot tažnosti a kontrakce prozatím nelze vytvořit jasný závěr, zda a jak velikost dopadové rychlosti ovlivňuje tažnost materiálu. K tomu by bylo potřebné provést více zkoušek s větší škálou hodnot dopadových rychlostí. Prozatím, z dosud obdržených výsledků, je možné vytvořit předběžnou hypotézu, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru se zvyšuje i tažnost materiálu. Ale jak bylo řečeno výše, toto tvrzení je nutné ověřit rozsáhlejšími experimenty.

Jedním z hlavních cílů práce bylo ověřit správnou funkčnost navrženého tahového přípravku. Ověření bylo založeno na porovnání výsledků skutečných (fyzikálních) experimentů s výsledky získanými simulací. Pro ověřování byla použita hodnota maximálního skutečného deformačního napětí po průchodu napěťového rázu. Z experimentální části byly pro vyhodnocování brány pouze ty křivky, které se vyznačovaly kvalitním záznamem tahové zkoušky. Z celkem 20 zkoušek tomu odpovídalo pouze 8. Numerická simulace byla prováděna pomocí školní verze programu ANSYS 14.0 (modul ANSYS LS – DYNA). Maximální hodnoty skutečného deformačního napětí získané z experimentů a hodnoty získané z numerické simulace se víceméně shodovaly. Relativní chyba obdržených výsledků nepřesahovala 10 %, což svědčí o správné funkci přípravku a experimentální výsledky je tedy možné využívat v praktických úlohách.

U vybraných 8 vzorků byla také vypočtena hodnota maximální tahové síly. Na základě těchto hodnot a s využitím standardní metodiky vyhodnocování pro Hopkinsonův test byly vytvořeny křivky závislosti smluvního deformačního napětí na deformaci vzorku a také křivky závislosti rychlosti deformace na deformaci vzorku.

Průběhy křivek ukázaly, že se zvyšující se rychlostí deformace narůstá deformační odpor materiálu.

Dále byla zkoumána závislost velikosti dopadové rychlosti impaktoru na geometrii vzorku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu. Jako mez pevnosti byla brána hodnota, která byla získána z numerické simulace. Na základě prozkoumání naměřených hodnot geometrie vzorku a dopadové rychlosti impaktoru bylo zjištěno, že se zvyšující se dopadovou rychlostí impaktoru klesá skutečný průřez vzorku na mez pevnosti

Za hlavní přínos této dizertační práce považuji vyvinutí a ověření tahového přípravku sloužícího k testování plochých vzorků na Hopkinsonově zařízení. Na základě porovnání provedených experimentů a výsledků numerické simulace lze konstatovat, že navržený přípravek funguje správně a získané výsledky tak lze uplatnit i v praxi. Podmínkou ovšem je získání čistého záznamu z osciloskopu. A dále je zde nutné vycházet z faktu, že pomocí Hopkinsonova testu je možné zachytit pouze počáteční rozvoj plastické deformace materiálu vzorku.

Přípravek pro testování plochých vzorků, navržený v rámci řešení předkládané dizertační práce, byl v roce 2012 uznán Úřadem průmyslového vlastnictví ČR jako užitný vzor č. 23703.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MEYERS. Marc A, *Dynamic behavior of materials*. New York: John Wiley & Sons. 1994, 668 s. ISBN 0-471-58262-x.
- [2] CHEN, Weinong W, *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*. New York: Springer, c2011, ix, 388 s. Mechanical engineering series. ISBN 978-1-4419-7981-0.
- [3] HAUGOU, G., E., MARKIEWICZ a J. FABIS. On the use of the non direct tensile loading on a classical split Hopkinson bar apparatus dedicated to sheet metal specimen characterisation, *International Journal of Impact Engineering*, 2006, roč. 32, č. 5, s. 778-798, ISSN 0734743x, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.07.015, Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X05001107>
- [4] GOMEZDEL RIO, T, Christian KETTENBEIL a Nik PETRINIC, Dynamic tensile behaviour at low temperature of CFRP using a split Hopkinson pressure bar, *Composites Science and Technology* [online], 2005, roč. 65, č. 1, s. 61-71 [cit. 2013-03-25], ISSN 02663538, DOI: 10.1016/j.compscitech.2004.06.004, Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353804001617>
- [5] VERLEYSEN, P., J, DEGRIECK, T, VERSTRAETE a J, SLYCKEN, Influence of Specimen Geometry on Split Hopkinson Tensile Bar Tests on Sheet Materials. *Experimental Mechanics*. 2008, roč. 48, č. 5, s. 587-598, ISSN 0014-4851, DOI: 10.1007/s11340-008-9149-x. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11340-008-9149-x>
- [6] CHEN, Y., A,H, CLAUSEN, O.S. HOPPERSTAD a M, LANGSETH, Application of a split-Hopkinson tension bar in a mutual assessment of experimental tests and numerical predictions. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, roč. 38, č. 10, s. 824-836, ISSN 0734743x, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.002, Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X11000790>
- [7] GERLACH, Robert, Christian KETTENBEIL a Nik PETRINIC, A new split Hopkinson tensile bar design, *International Journal of Impact Engineering* [online], 2012, roč. 50, s. 63-67 [cit. 2013-03-25], ISSN 0734743x, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.08.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734743X1200156X>
- [9] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK, Experimentální metody: syllabus. In: *Studijní opory* [online], 2003 [cit. 2013-03-13], Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf

- [10] ŠLAIS. M.; DOHNAL, I.; FOREJT, M.; ŠVEC, P. Měření rázové síly při TAT, *Kovárenství*, 2012, roč. 2012, č. 44, s. 73-76, ISSN: 1213- 9289.
- [11] FOREJT, Milan, Jan KREJČÍ a Jaroslav BUCHAR, *Teorie a technologie tváření vysokými deformačními rychlostmi a energiemi: Vybrané statě z tváření*, Brno, 1994, 69 s.
- [12] KAISER, Michael Adam, Advancements in the Split Hopkinson Bar Test, *[online]*, 1998 s. 94, Dostupný z WWW:
<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-41998-18465/unrestricted/ETD.pdf>
- [13] DOHNAL, I.; ŠLAIS. M.; FOREJT, M. CAPACITANCE DETECTORS USED FOR SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR TEST (SHPBT) AND THEIR COMPARISON WITH NUMERIC SIMULATION SHPBT, In *METAL 2013*, 2013, s. 1-6, ISBN: 978-80-87294-39- 0,
- [14] CLAUSEN. Arild H.. Tore BÅRVIK. Odd S. HOPPERSTAD a Ahmed BENALLAL. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate. temperature and triaxiality. *Materials Science and Engineering: A*. 2004. roč. 364. 1-2. s. 260-272. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.027. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509303007032>
- [15] IINO, Y.; ŠVEJCAR, J.; DLOUHÝ, I.; FOREJT, M. Effect of Strain Rate 10^{-4} to 10^3 s^{-1} on Room Temperature Tensile Properties and Notch Plastic Zone of Type 304 Stainless Steel. In *ECF17-Multilevel Approache to Fracture of Materials. Components and Structures*. Brno: VUTUM Brno, 2008. s. 773-779. ISBN: 9781617823190.
- [16] UŽITNÝ VZOR Č. 23703. *Úřad průmyslového vlastnictví ČR* [online]. 2014 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z:
<http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0023/uv023703.pdf>
- [17] BUCHAR, Jaroslav a Josef VOLDŘICH. *Terminální balistika*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2003, 340, [8] p. ISBN 80-200-1222-2.
- [18] PETRUŽEKA, Jiří, Teorie tváření : 1D plasticita, [online], [cit. 2013-03-26], s. 1-21, Dostupný z WWW:
<<http://www.345.vsb.cz/jiripetruselka/TTV/61DPlasticitaTT.pdf>>.

PŘEHLED ČINNOSTÍ AUTORA

Publikace:

1. DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; MRŇA, L. Hopkinson Tensile Tests of Flat Specimens. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2013, roč. 3, č. 9, s, 560-565, ISSN: 2159- 5275.
2. DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M. CAPACITANCE DETECTORS USED FOR SPLIT HOPKINSON PRESSURE BAR TEST (SHPBT) AND THEIR COMPARISON WITH NUMERIC SIMULATION SHPBT. In *METAL 2013*, 2013, s, 1-6, ISBN: 978-80-87294-39- 0.
3. MRŇA, L.; KOPECKÝ, L.; NĚMEČEK, T.; MIKMEKOVÁ, Š.; DOHNAL, I. LASER WELDING OF DOMEX STEEL AND HETEROGENOUS WELD WITH DC01. In *METAL 2013*, 2013, s, 1-6, ISBN: 978-80-87294-39- 0.
4. ŠLAIS, M.; DOHNAL, I.; FOREJT, M.; ŠVEC, P. Měření rázové síly při TAT, *Kovárenství*, 2012, roč. 2012, č. 44, s, 73-76, ISSN: 1213- 9289.
5. ŠLAIS, M.; DOHNAL, I.; FOREJT, M. Determination of Johnson- Cook equation parameters. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2012, roč. 2012, č. 3, s. 125-132, ISSN: 1335- 1532.
6. DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; MRŇA, L. Hopkinson tensile tests of flat specimen. In *The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering*, MM průmyslové spektrum. Brno: BUT- FMI Institute of Manufacturing Technology, 2011, s. 79-83, ISBN: 978-80-214-4267- 2.
7. DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; SAMEK, R. Tensile tests of flat bars at high strain rate. *Acta Mechanica Slovaca*, 2011, roč. 2011, č. 3, s. 46-50, ISSN: 1335- 2393.
8. DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; SAMEK, R. Dynamické tahové zkoušky plochých tyčí Hopkinsonovým testem. *Kovárenství*, 2011, roč. 2011, č. 40, s. 50-52, ISSN: 1213- 9289.

Funkční vzorky:

1. DOHNAL, I.; FOREJT, M.; ŠLAIS, M.: SHTBT-2011- 3; *Modifikace zařízení pro dynamické tahové zkoušky plochých vzorků - Hopkinsonův test*. VUT v Brně, ÚST, odbor tváření kovů a plastů, laboratoř B1/ 411. (funkční vzorek)
2. MRŇA, L.; LIDMILA, Z.; ŘIHÁČEK, J.; DOHNAL, I.; KUBÍČEK, J.; PODANÝ, K.: Solhar01; *Harmonikový solární absorbér*. C/ 206. (funkční vzorek)

Patenty:

1. DOHNAL, I.; ŠLAIS, M.; FOREJT, M.; VUT v Brně: *Přípravek k dynamickému testování materiálu v tahu*. 23703, užitečný vzor. (2012)

Abstrakt:

Dizertační práce pojednává o možnosti provádění dynamických tahových zkoušek. K tomuto účelu je využíváno zařízení Hopkinsonovy dělené tyče (dále jen SHPBT). Základní konstrukce zařízení je určena k provádění dynamických kompresních testů nejen na kovových materiálech, ale i na plastech a keramice. Dosaženými výsledky jsou závislost deformačního napětí na deformaci a rychlost deformace na deformaci. SHPBT je schopné testovat materiály za vyšších rychlostí deformace a to 10^2 až 10^3 s^{-1} .

Aby bylo možné provádět mechanické tahové zkoušky materiálu na SHPBT za vyšších rychlostí deformace, byl k tomuto účelu vyvinut speciální přípravek. Tento přípravek slouží k testování plochých vzorků o tloušťce 2 mm a byl uznán Úřadem průmyslového vlastnictví ČR jako užitný vzor s číslem 23703. Při testování tohoto přípravku byly použity vzorky vyrobené z korozivzdorné austenitické oceli dle ČSN 41 7240 o tloušťce 2 mm. V rámci řešení dizertační práce byla také provedena numerická simulace v programu ANSYS – LS Dyna, která ověřovala funkčnost navržené konstrukce tohoto přípravku.

Klíčová slova: Hopkinsonův kompresní test (SHPBT), ploché vzorky, dynamická tahová zkouška, korozivzdorná ocel 1.4301 (ČSN 41 7240), metoda konečných prvků.

Abstract:

The PhD thesis deals with the possibility of performing dynamic tensile tests. For this purpose, Split Hopkinson Pressure Bar Test (hereinafter SHPBT) is used. The basic construction of SHPBT device is designed to perform dynamic compression tests on materials (metals, plastics, and ceramics). The obtained results are deformation stress – strain and strain rate – strain dependences. SHPBT is capable of testing materials at high strain rates up to $10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$.

It was created a special device for dynamic tensile tests of materials at high strain rates. The created device uses the basic construction of SHPBT. The special device is used for testing flat specimens with 2 mm thickness. It was recognized by the Industrial Property Office of the Czech Republic as a utility model with number 23703. The specimens used for dynamic tensile testing were made of austenitic stainless steel (W.Nr. 1.4301) with 2 mm thickness. The verification of created device was carried out by numerical simulation. The numerical simulation was performed by ANSYS LS – Dyna software.

Key words: Split Hopkinson Pressure Bar Test (SHPBT) – Split Hopkinson Tensile Bar Test (SHTBT), flat specimens, dynamic tensile test, stainless steel 1.4301 (ČSN 41 7240), finite element method.

CURRICULUM VITAE

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno a příjmení: Ivo Dohnal, Ing.

Datum narození: 5. 3. 1986

Adresa: Přibyslavice 162, 675 21 Okříšky

E-mail: dohnal.ivo@seznam.cz

Státní příslušnost: česká

DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ

Vysoké učení technické v Brně: 2008 - 2010

Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor svařování a povrchových úprav

Téma diplomové práce: Numerická simulace svařování lopatky a rotoru turbíny.

Vysoké učení technické v Brně: 2005 - 2008

Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor svařování a povrchových úprav

Téma bakalářské práce: Vliv složení ochranné atmosféry na přenos kovu při MIG/MAG svařování oceli.

Střední průmyslová škola technická, Třebíč: 2001 - 2005

Obor strojírenství

ZNALOSTI

Jazykové znalosti:

Anglický jazyk – mírně pokročilá znalost

Ruský jazyk – základní znalost

Počítačové znalosti:

OS Windows, Microsoft WORD, Microsoft EXCEL, Microsoft POWERPOINT, AutoCAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, základy programu ANSYS